
Modellierung und Simulation von Altpapiersortieranlagen

Am Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Anke Gottschling, M. Sc.

aus Seeheim-Jugenheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
Tag der Einreichung:	09.02.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	18.05.2016

D17



Kurzfassung

In Altpapiersortieranlagen wird gesammeltes Altpapier einer trockenen mechanischen Aufbereitung unterzogen, um es als Rohstoff für die Papierherstellung bereitzustellen. Im Zusammenhang mit der Planung und dem Betrieb dieser Anlagen ergeben sich Fragestellungen, bei deren Bearbeitung sich der Einsatz von Fließschemasimulationswerkzeugen anbietet. Bei der Fließschemasimulation werden verfahrenstechnische Prozesse mittels eines Netzwerks aus Stoffströmen und Grundoperationen abstrahiert, sodass sie virtuell untersucht werden können.

Aufgrund fehlender Werkzeuge kann das Potential von Fließschemasimulationen zum aktuellen Zeitpunkt allerdings nicht für die Altpapiersortierung erschlossen werden. Hauptziel dieser Arbeit ist es daher, eine Beschreibung für die Stoffströme und Modelle für die Grundprozesse der Altpapiersortierung zu entwickeln. Außerdem soll eine Methode zur Datenerfassung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen, die auf der Entnahme von Stichproben beruht, erstellt werden.

Zu Beginn der Arbeit wird der Stand der Technik der Altpapiersortierung in Deutschland zusammengefasst und der Stand des Wissens zu Werkzeugen für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen zusammengetragen.

Danach wird die Beschreibung der Stoffströme entwickelt. In dieser Beschreibung ist der Stoff Altpapier ein Gemisch von Stoffgruppen und diese Stoffgruppen sind durch Eigenschaften charakterisiert. 18 Stoffgruppen, die für die Altpapiersortierung relevant sind, werden in einem Stoffgruppenkatalog definiert. Als charakterisierende Eigenschaft wird die Verteilung der Teilchengröße in die Beschreibung aufgenommen. Die Stoffstrombeschreibung ist modular aufgebaut, sodass sie an unterschiedliche Fließschemasimulationsaufgaben angepasst werden kann.

Die Methode für die Datenerfassung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen wird anschließend auf Basis der Stoffstrombeschreibung erarbeitet. Es werden Verfahren zur Entnahme von Stichproben, zu deren Analyse und zur Bestimmung von Massenströmen festgelegt.

Für die Analyse der Stichproben wird ein Probenanalysegerät in Form einer automatischen Messanlage entwickelt. Der Hauptsensor dieser Anlage ist eine Farbkamera. Es werden Algorithmen zur Bildanalyse implementiert, welche die Verteilung

der Teilchengröße einer Altpapierprobe ermitteln. Zusätzlich werden Algorithmen zur Mustererkennung erstellt, sodass die Messanlage zwischen Objekten der Stoffgruppen Zeitungen, Illustrierte und Magazine, Werbedruck, weiße Papiere, graue Papiere und braune Wellpappen automatisch unterscheiden kann. Der Aufwand zur Analyse von Altpapierproben beträgt beim Einsatz der Anlage weniger als 1 Stunde pro 10 kg Probenmenge und liegt damit deutlich unter dem Aufwand einer rein händischen Probenanalyse.

Mittels der entwickelten Datenerfassungsmethode werden Daten in industriellen Altpapiersortieranlagen erhoben. Dafür werden fünf Anlagen, die Altpapier aus haushaltsnaher Sammlung zum Hauptzielprodukt Deinkingware verarbeiten, im Normalbetrieb untersucht.

Als nächstes werden die Grundprozesse der Altpapiersortierung, die Grobsiebung, Feinsiebung, Paperspikeprozesse sowie die automatische und manuelle Klaubung, modelliert. Dabei wird ein grundlegendes Black-Box-Modell ohne zeitliche Abhängigkeiten erstellt, das die Grundprozesse der Altpapiersortierung allgemein beschreibt. Dieses Grundmodell wird für die einzelnen Prozesse konkretisiert. Bei der Konkretisierung wird bspw. für die Siebprozesse die Teilchengröße in Form von Trenngradkurven berücksichtigt. Die so gebildeten Modelle enthalten Parameter, die anschließend mittels der erfassten Messdaten bestimmt werden.

Zum Schluss der Arbeit wird die Anwendung der entwickelten Fließschemasimulationswerkzeuge demonstriert. Hierzu wird ein Gesamtanlagenmodell aus Grundprozessmodellen zusammengesetzt und mittels Messdaten validiert. Dieses Gesamtanlagenmodell wird in zwei Fließschemasimulationen mit praxisrelevanten Modellszenarien eingesetzt und dadurch gezeigt, dass die entwickelten Simulationswerkzeuge eine virtuelle Untersuchung von Altpapiersortieranlagen ermöglichen.

In der industriellen Praxis lassen sich die entwickelten Werkzeuge bspw. bei der Projektierung oder der Optimierung von Altpapiersortieranlagen anwenden. Auch in der Forschung bieten sich, z. B. bei Untersuchungen des Altpapierkreislaufs, Anwendungsmöglichkeiten.

Abstract

Recovered paper needs to be sorted before it can be used as a secondary raw material for the manufacture of new paper. For the planning or operation of sorting plants for recovered paper flowsheet simulations could be a valuable instrument. In flow sheet simulations an abstract network of material streams and unit operation models is generated to virtually investigate process plants.

Due to missing tools the potential of flow sheet simulations can currently not be exploited for recovered paper sorting. Therefore the main objective of this thesis is to develop a material stream description and models for the unit operations of recovered paper sorting. Additional aim is the development of a method for collecting data of material streams in industrial sorting plants based on sampling.

At the beginning of the thesis the state of the art of sorting plants for recovered paper in Germany is summarized and the state of knowledge about tools for flowsheet simulations of sorting plants for recovered paper is compiled.

The material stream description is developed afterwards. In this description recovered paper is a mixture of material groups and those groups are characterised by properties. In this thesis 18 materials groups, which are relevant for recovered paper sorting, are specified in a material group catalogue. The particle size distribution is taken into account as a characterising property. The structure of the material stream description is modular so that it can be adapted to different flowsheet simulation tasks.

The method for collecting data of recovered paper streams in industrial sorting plants is based on the material stream description. Procedures for sampling, for the analysis of samples and for measuring mass flows are defined.

For the analysis of samples an instrument in form of an automatic measuring system is designed. The main sensor of the system is a colour camera. Image analysis algorithms are implemented to determine the particle size distribution of a sample. Additional algorithms for pattern recognition are developed so that the system can automatically distinguish between objects of the material groups newspapers, magazines, advertisement, white papers, grey papers and brown corrugated board. The time needed for analysing samples with the system amounts to 1 hour per 10 kg

of recovered paper. This is substantially shorter than the time needed for manual sample analyses.

The developed method is used to collect data in industrial sorting plants for recovered paper. Five plants that process recovered paper from household collection and produce sorted graphic paper for deinking are investigated during standard operation.

The unit operations for recovered paper sorting, coarse screening, fine screening, paperspike processes, hand picking and sensor-based sorting, are modelled afterwards. A basic steady state black box model is used to describe all unit operations in general. This basic model is specified for each individual unit operation. In the model for the screening processes the particle size is taken into account by screen classification functions. All unit operation models contain parameters which are fitted to the collected data.

At the end of the thesis the application of the developed flowsheet simulation tools is demonstrated. A flowsheet of an entire sorting plant for recovered paper is set up with unit operation models and validated by measured data. This flowsheet is used in two simulations with scenarios of practical relevance. The simulations show that the developed tools are suitable for a virtual investigation of sorting plants for recovered paper.

Application fields for the developed tools are the planning and operating of industrial sorting plants for recovered paper. In research the tools can, for example, be applied in investigations covering the circle of paper recycling.





Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung und Vorgehen	2
2 Stand des Wissens	5
2.1 Stand der Technik der Altpapiersortierung in Deutschland	5
2.1.1 Grobsiebung	7
2.1.2 Feinsiebung	7
2.1.3 Paperspikoprozesse	9
2.1.4 Automatische Klaubung	9
2.1.5 Handklaubung	12
2.2 Werkzeuge für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen	13
2.2.1 Stoffstrombeschreibung	13
2.2.2 Modelle der Grundprozesse	13
3 Beschreibung der Stoffströme	19
3.1 Stoffgruppen	20
3.2 Eigenschaften	23
4 Entwicklung einer Datenerfassungsmethode	25
4.1 Probenahme	25
4.1.1 Grundlagen	25
4.1.2 Methode	27
4.2 Probenanalysegerät	29
4.2.1 Funktionsstruktur	30
4.2.2 Konzept	31
4.2.3 Mustererkennung	32
4.2.4 Fazit	44
4.3 Bestimmung der Massenströme	44

5	Durchführung der Datenerfassung	47
5.1	Probenahme	47
5.2	Bestimmung der Massenströme	47
5.3	Probenanalyse	49
6	Modellierung der Grundprozesse	53
6.1	Methoden	53
6.2	Grundmodell	54
6.3	Siebklassierung	56
6.3.1	Grobsiebung	60
6.3.2	Feinsiebung	66
6.4	Paperspikeprozesse	71
6.5	Automatische Klaubung	73
6.6	Handklaubung	76
6.7	Fazit	79
7	Modellvalidierung und Fließschemasimulation einer Altpapiersortier- anlage	81
7.1	Gesamtanlagenmodell	81
7.2	Modellvalidierung	82
7.3	Beispielsimulationen	86
7.4	Fazit	89
8	Zusammenfassung und Ausblick	91
	Literaturverzeichnis	94
A	Automatische Messanlage für die Probenanalyse	101
A.1	Spezifikationen	101
A.2	Merkmalalgorithmen	101
A.2.1	Masse	101
A.2.2	Form	101
A.2.3	Farbe	102
A.2.4	Muster	105
A.3	Ergebnisse der statistischen Analyse der Merkmale	108
B	Zuordnungskatalog der Stoffgruppen für händische Sortieranalysen	117
C	Messdaten	119
C.1	Grobsiebung	119

C.2	Feinsiebung	127
C.3	Paperspikeprozess	129
C.4	Automatische Klaubung	130
C.5	Handklaubung	132
C.6	Gesamtanlage	134



Symbolverzeichnis

Symbole mit mehrfacher Bedeutung sind hier mehrfach aufgeführt. Sie ergeben sich aus dem jeweiligen Kontext, in dem sie auftauchen.

Symbole, die nur im Anhang dieser Arbeit vorkommen, sind dort erklärt und hier nicht aufgeführt.

Abkürzungen

B	Bücher
B.	Beschreibung
Dun	für Deinking ungeeignet
g	gemischte Objekte
H	Hygienepapiere
HSV	Hue, Saturation, Value
IM	Illustrierte und Magazine
K.	Kriterium
Kgr,b,ge	Karton und Pappe grau, braun und gefärbt
Kw,g,h	Karton weiß, gelb, hell
MIR	im mittleren Infrarotbereich
NIR	nahinfrarot
NTSC	National Television Systems Committee
pf	papierfremde Bestandteile
Pge	gefärbte grafische Papiere
Pgr	Papiere grau, gelblich
Pgrafisch	grafische Papiere
Pgrr	restliche grafische Papiere (erwünscht)
PPKu	sonstige ungeeignete Papiere, Pappen, Karton

PPKunerw	für Deinking unerwünscht
PPKv	Papiere, Pappen, Karton stark verschmutzt
Pr	restliche Papiere
Pw	Papiere weiß, hell
RGB	rot, grün, blau
RRSB	Rosin-Rammeler-Sperling-Bennett
run11	restliche Papiere, in 1.11.00 unerwünscht
S	Sortierrest
un02	Papiere, in 1.02.00 unerwünscht
un04	Papiere, in 1.04.00 unerwünscht
UV	ultraviolett
V	restliche Verpackungen
VIS	im sichtbaren Lichtspektrum
Vs	sonstige Verpackungspapiere
W	Wellpappe
Wb	Wellpappen braun
Wd	Werbedruck
Ww	Wellpappen weiß
Z	Zeitungen

Formelzeichen

a	Massenanteil
b	Prüfmerkmal
\bar{b}	arithmetischer Mittelwert des Prüfmerkmals
C	Flächenanteil
D	Diffusionskoeffizient
e	Trennmerkmal
$E I$	Biegesteifigkeit
f	Funktion

f	Streckenlast
F	Trennfunktion
F	Kraft
G	Änderung der Masse durch Agglomerieren oder Zerteilen
H	Farbton
\bar{H}	mittlerer Farbton
$\Delta\bar{H}$	Differenz des mittleren Farbtons
l	Länge
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
Δm	Teilmasse
M	Anzahl der Freiheitsgrade
n	Steilheitsparameter
N	Anzahl
p	Modellparameter
q	Verteilungsdichte
\bar{q}	mittlere Verteilungsdichte
s	Schätzwert für die Standardabweichung
$s_{\bar{b}}$	empirische Standardabweichung des Mittelwerts des Prüfmerkmals
S	statistische Sicherheit
S	Farbsättigung
\bar{S}	mittlere Farbsättigung
t	kritischer Wert der t -Verteilung
Δt	Zeitintervall
T	Trenngrad
\bar{T}	mittlerer Trenngrad
v	Geschwindigkeit
ν	Gutmassenanteil
w	Verschiebung

x	Teilchengröße bzw. -länge
x_1	Teilchenlänge
x_2	Teilchenbreite
\bar{x}	mittlere Teilchenlänge
Δx	Intervallbreite
x'	Lageparameter
α	Irrtumswahrscheinlichkeit
Γ	Gammafunktion
μ	Erwartungswert

Indizes

a	Akzept
A	ausfließend
AK	automatische Klaubung
b	braun
B	Ballen
E	einfließend
f	Feingut
f	Papierfremdes
F	Förderband
FS	Feinsieb
g	Grobgut
g1	grau 1
g2	grau 2
ges	Gesamt-
GS	Grobsieb
k	Stoffgruppe
l	Fenster
L	Fenster mit Vordergrundpixeln

max	maximal bzw. Maximum
min	minimal
O	Objekt
P	Probe
P	Pixel
PS	Paperspike
<i>r</i>	Mengenart
r	Rejekt
t	mit regelmäßigem Text
un	für Deinking unerwünscht
UV	ultraviolett
v	volumenbezogen
w	weiß
<i>z</i>	Intervall



1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Sekundärrohstoff Altpapier ist der wichtigste Rohstoff der deutschen Papierindustrie. Im Jahr 2014 betrug der Massenanteil am Gesamtrohstoffverbrauch 63,7 % [vdp15]. Dies entspricht 16,6 Millionen Tonnen. Die Vorteile des Sekundärfaserstoffs Altpapier gegenüber den ansonsten eingesetzten Primärfaserstoffen Holzstoff oder Zellstoff sind der günstige Preis, die Einsparmöglichkeiten von Ressourcen wie Energie, Wasser und Holz sowie die Vermeidung von Abfall [Bos06, IDHB12]. In Abhängigkeit der Ausstattung einer Papierfabrik und der produzierten Papiersorte, muss das als Rohstoff eingesetzte Altpapier eine definierte Qualität aufweisen. Bspw. darf Altpapier, das als Rohstoff für grafische Papiere verwendet wird, kaum ungebleichtes Fasermaterial enthalten, da ansonsten die optische Qualität des grafischen Recyclingpapiers verschlechtert wird. Aus diesem Grund legt die europäische Liste der Altpapier-Standardsorten DIN EN 643 [DIN EN 643] Handelsklassen für Altpapier als Rohstoff in der Papierindustrie fest. Die Norm unterteilt die Altpapiersorten in fünf Gruppen: untere Sorten, mittlere Sorten, bessere Sorten, krafthaltige Sorten und Sondersorten. Von diesen Sortengruppen sind in Deutschland die unteren Sorten mit einem Verbrauch von 12,8 Millionen Tonnen mit Abstand am häufigsten [vdp15]. Sie werden üblicherweise dadurch erzeugt, dass Altpapier aus haushaltsnaher Altpapiersammlung in Sortieranlagen einer trockenen, mechanischen Aufbereitung unterzogen wird [HT14]. Diese Aufbereitung wird in der vorliegenden Arbeit als Altpapiersortierung bezeichnet. Sie hat zum einen das Ziel, den Anteil papierfremder Bestandteile im Altpapier so zu reduzieren, dass ein in der Sortenliste festgelegter Grenzwert eingehalten wird. Zum anderen wird das Altpapiergemisch aus der Sammlung in Fraktionen unterschiedlicher Papierprodukte geteilt, sodass die Fraktionen gemäß der Sortenliste gehandelt werden können.

Im Zusammenhang mit der Planung und dem Betrieb von Altpapiersortieranlagen ergibt sich eine Vielzahl an Fragestellungen. Einige Beispiele sind im Folgenden genannt:

- Was ist bei gegebenen Randbedingungen eine geeignete oder optimale Struktur einer Altpapiersortieranlage?

-
- Welchen Einfluss haben Modifikationen einer gegebenen Anlage oder Rohstoffveränderungen auf das Sortierergebnis ?
 - Wie müssen die Betriebsparameter einer gegebenen Sortieranlage gewählt werden, damit die Anlage möglichst effizient betrieben werden kann?
 - Welches Potential haben neu entwickelte oder veränderte Sortieraggregate?

Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen bietet sich der Einsatz von Fließschemasimulationswerkzeugen an. Bei der Fließschemasimulation werden verfahrenstechnische Prozesse als ein Netzwerk von Stoffströmen abstrahiert, dessen Knoten durch Grundoperationen beschrieben werden [Sch95]. Der Vorteil der Fließschemasimulation liegt darin, dass Anlagenstrukturen oder -betriebszustände virtuell untersucht und dadurch kosten- und/oder zeitintensive experimentelle Untersuchungen in der industriellen Praxis ersetzt werden können [KS12]. Dieses Potential kann zum aktuellen Zeitpunkt aufgrund fehlender Simulationswerkzeuge für die Altpapiersortierung allerdings nicht erschlossen werden.

Fließschemasimulationswerkzeuge für die Altpapiersortierung werden zusätzlich auch in einem anderen Zusammenhang benötigt: bei der ganzheitlichen Modellierung des Altpapierkreislaufs. Der Altpapierkreislauf (siehe Bild 1.1) besteht aus der Sammlung, Sortierung, Aufbereitung in der Suspension, Papierherstellung, Druck und Verarbeitung sowie dem Gebrauch [MBG⁺10]. Ansätze zur Gesamtmodellierung werden bspw. in [IDHB12, INCB10, BIC10], [TM15] oder im Rahmen des Projekts *REFFIBRE* (Tools for Resource-Efficient use of recycled *FIBRE* materials) [ref16] erarbeitet und sollen dazu dienen, die Ressourceneffizienz und die Wertschöpfung des Altpapierkreislaufs zu erhöhen. Für die Altpapiersortierung stellt sich bspw. die Frage, ob zwischen der Altpapiersortierung und der anschließenden Aufbereitung in der Suspension Redundanzen vorliegen, die abgebaut werden könnten, oder ob Synergiepotential besteht. Durch eine Gesamtbetrachtung der Prozesse kann hierauf ggf. eine Antwort gefunden werden.

1.2 Zielstellung und Vorgehen

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, Werkzeuge für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen zu entwickeln. Die Werkzeuge sollen eine Beschreibung für die Stoffströme und Modelle für die in der Altpapiersortierung in Deutschland relevanten Prozesse umfassen.

Zusätzliches Ziel ist es, eine Methode für die Datenerfassung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen zu erstellen, die auf der Entnahme von Stichproben beruht.



Bild 1.1: Altpapierkreislauf

Hierbei ist ein Gerät zu entwickeln, das den zeitlichen und personellen Aufwand der Probenanalyse auf ein vertretbares Maß reduziert.

Im ersten Schritt der Arbeit werden die Grundlagen für die Entwicklung der Simulationswerkzeuge zusammengetragen (Kapitel 2). Anschließend wird die Beschreibung der Stoffströme erarbeitet (Kapitel 3) und darauf aufbauend die Methode für die Datenerfassung von Stoffströmen erstellt (Kapitel 4). Diese Methode wird danach zur Erhebung von Daten in industriellen Altpapiersortieranlagen eingesetzt (Kapitel 5). Bei der Modellierung der Prozesse werden die Daten dazu genutzt, Modellparameter anzupassen (Kapitel 6). Im letzten Schritt der Arbeit wird die Anwendung der Werkzeuge am Beispiel einer Anlagensimulation mit Modellvalidierung demonstriert (Kapitel 7).



2 Stand des Wissens

Die Darstellung der Grundlagen dieser Arbeit ist in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt wird der Stand der Technik der Altpapiersortierung in Deutschland zusammengefasst. Der Fokus liegt hierbei auf den eingesetzten Grundprozessen. Der zweite Abschnitt gibt eine Übersicht über Werkzeuge, die für die Fließschemasimulation von Altpapieraufbereitungsanlagen als Basis dienen.

2.1 Stand der Technik der Altpapiersortierung in Deutschland

Eine typische Altpapiersortieranlage in Deutschland verarbeitet Altpapier aus haushaltsnaher Sammlung und erzeugt als Hauptzielprodukt Altpapier der Sorte 1.11.00 (Deinkingware) gemäß [DIN EN 643]. Deinkingware wird z. B. für die Produktion von grafischen Papieren oder Tissuepapieren eingesetzt. Dazu werden bei der Altpapieraufbereitung in der Suspension Druckfarben aus dem Altpapier entfernt, um die grafischen Eigenschaften des zu erzeugenden Papiers zu verbessern. Der Prozess der Druckfarbenentfernung wird als Deinking bezeichnet [HS10].

Bei der Altpapiersortierung fallen meist als Nebenprodukte Altpapiere der Sorten 1.04 (Wellpappe bzw. Verpackungen aus Papier und Karton), und 1.02.00 (gemischtes Altpapier) an. Üblicherweise verfügt eine Altpapiersortieranlage über sechs Teilfunktionen [Rau11]:

1. Anlieferung und Lagerung des Eingangsmaterials,
2. Vorbereitung des Eingangsmaterials und Beschickung der Anlage,
3. Vorsortierung,
4. Hauptsortierung,
5. Nachsortierung,
6. Lagerung und Abtransport des Ausgangsmaterials.

Bild 2.1 zeigt den Übersichtsplan einer Beispielsortieranlage mit ihren Teilfunktionen. Für gewöhnlich wird das Eingangsmaterial einer Altpapiersortieranlage in einem Haufwerk gelagert, aus dem es mit Radladern in die Anlage aufgegeben

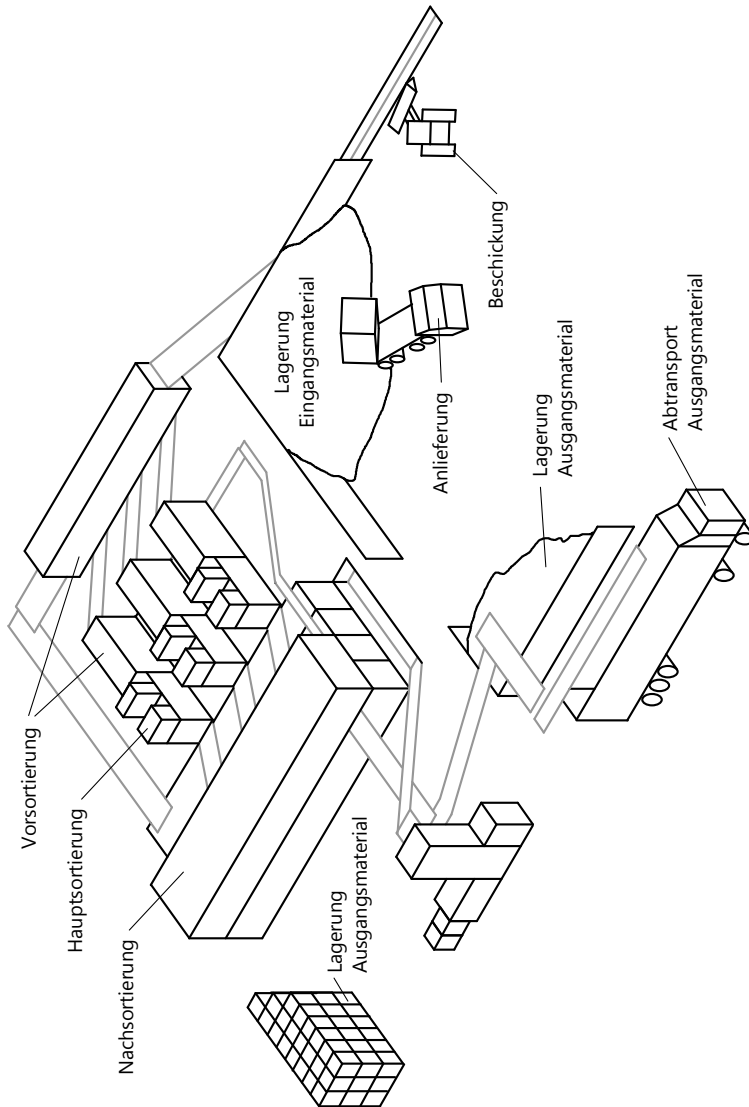


Bild 2.1: Übersichtsplan einer Altpapiersortieranlage mit Anlagenteilfunktionen

wird. Die Beschickung erfolgt entweder an einem Grubenband oder durch einen Dosierbunker mit Dosiertrommel. Durch die Vorsortierung wird das Material anschließend so vorbereitet, dass es von den Maschinen der Hauptsortierprozesse verarbeitet werden kann. Hierfür werden Siebklassierprozesse eingesetzt. In der Hauptsortierung werden die Altpapierbestandteile, die in der Deinkingware unerwünscht sind, abgetrennt. Dies erfolgt entweder durch automatische Klaubung, Handklaubung oder einen speziell für die Altpapiersortierung entwickelten Prozess, den Paperspikeprozess. Eine händische Nachsortierung wird durchgeführt, um restliche, unerwünschte Materialien, die in der Hauptsortierung nicht entfernt wurden, abzutrennen. Das sortierte Altpapier wird für den Transport entweder lose verladen oder in Ballen gepresst.

Die Grundprozesse zur Sortierung werden im Folgenden im Detail betrachtet.

2.1.1 Grobsiebung

Üblicherweise ist die Grobsiebung der erste Trennprozess in einer Altpapiersortieranlage. Die Hauptaufgabe des Prozesses liegt darin, Wellpappenkartonagen abzutrennen. Dabei wird ausgenutzt, dass Kartonagen aus Wellpappe den Hauptanteil der großflächigen Objekte im Eingangsmaterial von Altpapiersortieranlagen darstellen. Die Siebmaschenweite wird dementsprechend so gewählt, dass das Grobgut des Siebes einen sehr hohen Anteil an Wellpappen enthält. Es wird daher im Allgemeinen als eine der Sorten 1.04 verkauft. Das Feingut des Siebes wird als Hauptstrom der Altpapiersortieranlage weiter aufbereitet.

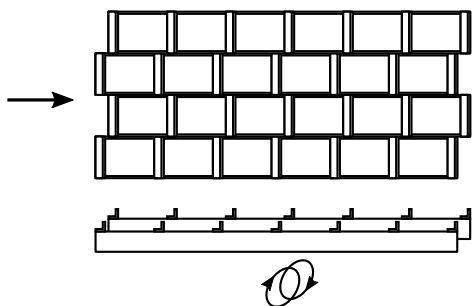
Die Nebenaufgabe der Grobsiebung ist es, weitere großflächige Altpapierbestandteile, die in den nachfolgenden Prozessen Störungen verursachen würden, abzutrennen.

Die zur Grobsiebung eingesetzten Maschinentypen, Ballistikseparatoren, Scheibensiebe und Sternsiebe, sind in Bild 2.2 dargestellt.

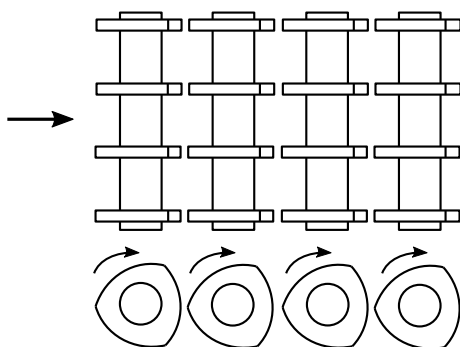
2.1.2 Feinsiebung

Die Feinsiebung ist der zweite mögliche Prozess der Vorsortierung. Die Aufgaben der Feinsiebung sind die Abtrennung von [HT14]:

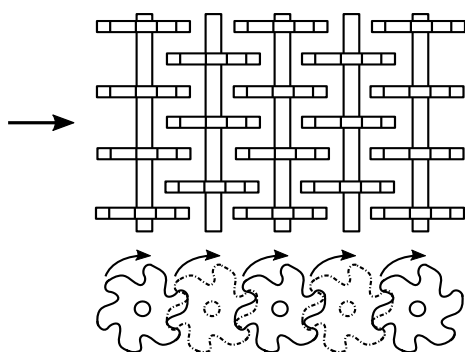
- kleinen papierfremden Bestandteilen, wie z. B. Glasscherben, Sand, Steinen,
- kleinen, unerwünschten Altpapierobjekten, da diese von den Prozessen der Hauptsortierung nur schlecht oder überhaupt nicht ausgetragen werden können,



Ballistikseparator



Scheibensieb



Sternsieb

Bild 2.2: Maschinentypen für die Grobsiebung von Altpapier

- Staub, der sowohl das Sortieranlagenpersonal belastet als auch die Maschinen zur automatischen Klaubung verschmutzt.

Diese Materialien gelangen in das Feingut des Siebes, welches als Nebenprodukt der Altpapiersorte 1.02.00 vertrieben werden kann. Das Grobgut des Feinsiebes bildet den Hauptstrom der Altpapiersortieranlage. Wie bei der Grobsiebung werden Scheibensiebe, Sternsiebe oder Ballistikseparatoren eingesetzt.

2.1.3 Paperspikeprozesse

Aufgabe der Paperspikeprozesse ist es, Wellpappenkartonagen aus dem Hauptstrom einer Altpapiersortieranlage auszutragen. Dies wird dadurch umgesetzt, dass die Altpapierobjekte über Nagelwalzen oder Nagelbänder von Nägeln angestochen werden. Dabei werden relativ steife Objekte wie Wellpappenkartonagen von den Nägeln durchlöchert und bleiben aufgrund von Widerhaken an ihnen stecken (siehe Bild 2.3). Weniger steife Altpapierobjekte verformen sich unter dem Druck der Nägel und werden somit nicht aufgespießt. Sie verbleiben im Hauptstrom [HT14, Fra05]. Objekte mit einer relativ hohen Durchstoßfestigkeit werden ebenfalls nicht aufgespießt, da die Nägel zum Schutz vor Zerstörung federnd befestigt sind [Bun12].

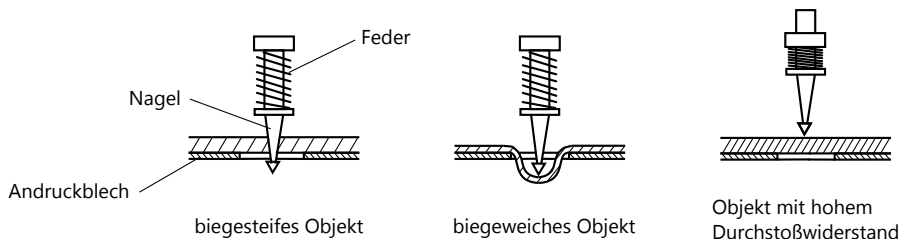


Bild 2.3: Funktionsprinzip des Paperspikeprozesses

Die aufgespießten Altpapierobjekte werden an einer anderen Stelle in der Sortiermaschine wieder von den Nägeln abgestreift und so vom übrigen Altpapierstrom separiert. Bild 2.4 zeigt schematisch eine Paperspikemaschine, die mit einer Nagelwalze arbeitet.

2.1.4 Automatische Klaubung

Bei der Klaubung wird jedes Teilchen eines Stoffstroms hinsichtlich des Trennmerkmals geprüft und ggf. aus dem Gutstrom ausgelenkt [Sch10]. Bei der automati-

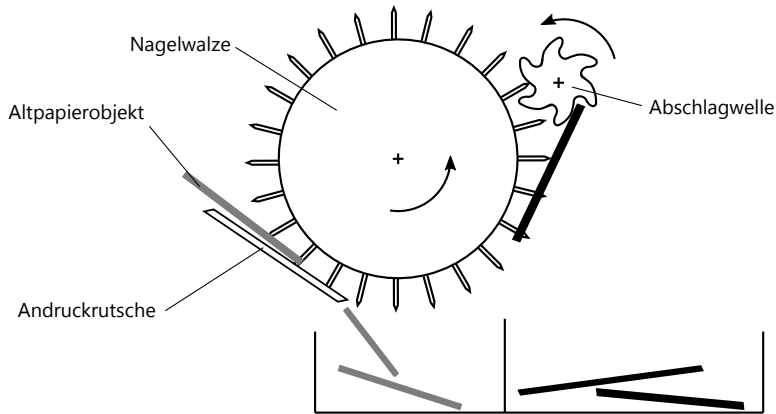


Bild 2.4: Paperspikemaschine mit Nagelwalze, schematisch

schen Klaubung in Altpapiersortieranlagen sollen Materialien abgetrennt werden, die im Hauptprodukt, der Deinkingware, unerwünscht sind. Die unerwünschten Materialien umfassen papierfremde Bestandteile und unerwünschte Papiere. In der Deinkingware sind folgende Papiere unerwünscht [DIN EN 643]:

- nicht-grafische Papiere, Karton und Pappe,
- Papier, Karton und Pappe ungeeignet für die Produktion von Papier,
- Papierprodukte, ungeeignet für Deinking.

Beispiele hierfür sind durchgefärbte Papiere, Wellpappenkartonagen, graue Kartonagen, Getränkekartons sowie Papierprodukte, die mit wasserbasierenden Farben bedruckt sind.

Die automatische Klaubung wird im Allgemeinen in drei aufeinander folgenden Prozessstufen umgesetzt (siehe Bild 2.5) [Sch10]:

1. Vereinzeln der Teilchen des Aufgabestroms,
2. Gewinnen von Messwerten des Trennmerkmals der einzelnen Teilchen und Auswertung (Detektion),
3. Auslenken der Teilchen, deren Messwerte eine festgelegte Schwelle über- oder unterschreiten (Ejektion).

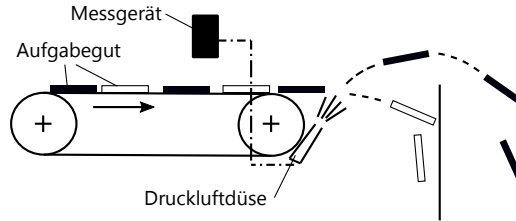


Bild 2.5: Wirkprinzip der automatischen Klaubung

Bei der automatischen Klaubung von Altpapier erfolgt eine Vorvereinzelung der Teilchen in den Prozessen der Vorsortierung. Die Hauptvereinzelung wird an einem Beschleunigungsband der Trennmaschine durchgeführt.

Bei der Detektion werden verschiedene Arten von Sensoren eingesetzt und ggf. in einer Maschine kombiniert. Mittels Nahinfrarot(NIR)spektroskopie kann zum einen Altpapier von Kunststoffen und Metallen unterschieden werden. Zum anderen können auch Eigenschaften erfasst werden, die eine Zuordnung zu verschiedenen Papierproduktklassen erlauben. Diese sind der Gehalt an mineralischen Bestandteilen im Papier, der Ligningehalt und der Einsatz wasserbasierender Druckfarben [BC12]. Der Einsatz von Farbkameras im sichtbaren Lichtbereich ermöglicht es, braune und graue Kartonagen sowie durchgefärbte Papiere zu erkennen [ste11, red15]. Auch Spektroskopie im sichtbaren Lichtbereich (VIS-Spektroskopie) findet Anwendung. Hierdurch lassen sich Pigmente aus Druckfarben, Farbstoffe und optische Aufheller identifizieren [Bou13]. Durch Thermografie im mittleren Infrarotbereich (MIR-Thermografie) kann auf das Flächengewicht der obersten Lage eines Papierprodukts geschlossen werden [Bou10]. Dadurch ist eine Erkennung von Kartonagen, die ein hohes Flächengewicht aufweisen, möglich.

Die mittels der Sensortechnologie als unerwünschte Materialien gekennzeichneten Altpapierteilchen werden anschließend mit Druckluft aus dem Hauptstrom aussortiert.

Die ausgeblasene Fraktion ist ein Nebenprodukt und wird, in manchen Sortieranlagen mit anderen Nebenproduktströmen gemischt, als Altpapiersorte 1.02.00 vermarktet.

Das Klaubeergebnis hängt von folgenden Einflussfaktoren ab [RK05]:

- Partikelabstand und Überlappung,
- Bandfläche und -geschwindigkeit,
- Massenstrom,

- zeitliche und räumliche Auflösung der Sensoren,
- Güte des angelerten Spektrums,
- Sauberkeit der Partikeloberflächen,
- Partikelgröße, -dichte und -form,
- Richtung und Stärke des Luftstoßimpulses.

2.1.5 Handklaubung

Die Handklaubung wird sowohl in der Hauptsortierung als auch in der Nachsortierung von Altpapiersortieranlagen eingesetzt. In beiden Fällen werden jeweils zwei Fraktionen abgetrennt: papierfremde Bestandteile und in der Deinkingware unerwünschte Papiere. Die Fraktion der unerwünschten Papiere ist ein Nebenprodukt und kann als Altpapiersorte 1.02.00 gehandelt werden.

Die Handklaubung erfolgt an Lesebändern (siehe Bild 2.6) und ihr Sortierergebnis unterliegt vielen Einflussgrößen. Die Klaubeleistung hängt unter anderem ab von [Sch10, Fra05]:

- Stückgrößen,
- Vereinzelung des Aufgabegutstroms auf dem Leseband,
- Schwierigkeit der Entscheidung,
- Erfahrung und Motivation des Sortierpersonals.

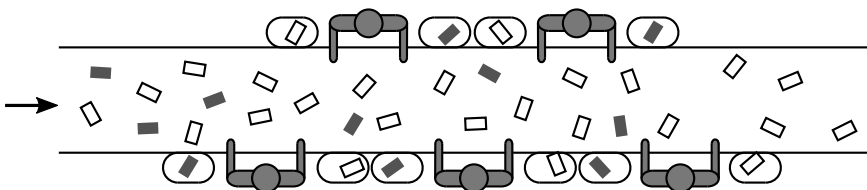


Bild 2.6: Funktionsprinzip der Handklaubung nach [Bun12]

2.2 Werkzeuge für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine ausführliche Recherche zu Werkzeugen für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen durchgeführt. Sie ergibt, dass unmittelbar zu diesem Thema keine Publikationen vorliegen. Da es sich bei den Grundprozessen der Altpapiersortierung aber um Prozesse der mechanischen Abfallaufbereitung oder allgemein der mechanischen Aufbereitung handelt, bilden Werkzeuge aus diesem Gebiet der Verfahrenstechnik eine Grundlage für die vorliegende Arbeit. Sie werden in den folgenden Abschnitten gegliedert in die Bereiche Stoffstrombeschreibung und Modelle der Grundprozesse zusammengefasst.

2.2.1 Stoffstrombeschreibung

[Ros09] stellt eine Stoffstrombeschreibung für die Simulation mechanischer Abfallaufbereitungsverfahren vor (siehe Bild 2.7). Sie ist hierarchisch aufgebaut und basiert auf einer allgemeinen Stoffstrombeschreibung für die Simulation mechanischer Feststoffprozesse aus [Töb99, Ros00, Pog07]. Auf der ersten Ebene der Strombeschreibung erfolgt zunächst eine Gliederung in Feststoffe und Fluide. Die stoffliche Zusammensetzung der festen Phase eines Abfallgemischs wird auf der nächsten Ebene durch die Verwendung von Stoffgruppen beschrieben. Jede Stoffgruppe wird durch Gesamteigenschaften, wie z. B. den Aschegehalt, und verteilte Eigenschaften, wie z. B. die Teilchengröße, charakterisiert.

Auch [Bey02] wählt für die Simulation von Abfallaufbereitungsverfahren eine Strombeschreibung durch Stoffgruppen, die er in einem Katalog zusammenfasst. Fluide werden nicht betrachtet. Die Charakterisierung der einzelnen Stoffgruppen erfolgt durch einen sogenannten spezifischen Teilvektor (siehe Bild 2.8).

2.2.2 Modelle der Grundprozesse

Modelle von Prozessen der mechanischen Aufbereitung korrelieren deren Aus- und Eingangsströme in Form von Bilanzgleichungen [Sch95]. In der vorliegenden Arbeit werden Massenbilanzgleichungen betrachtet. Für diesen Fall formuliert [Sch10] folgende grundlegende Gleichung, die im Prinzip als Modell für jeden Prozess der mechanischen Aufbereitung dienen kann

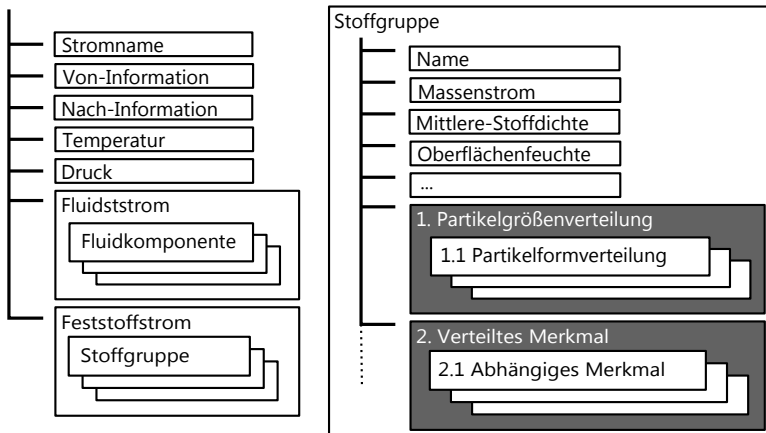


Bild 2.7: Struktur der Abfallstoffströme in [Ros09]

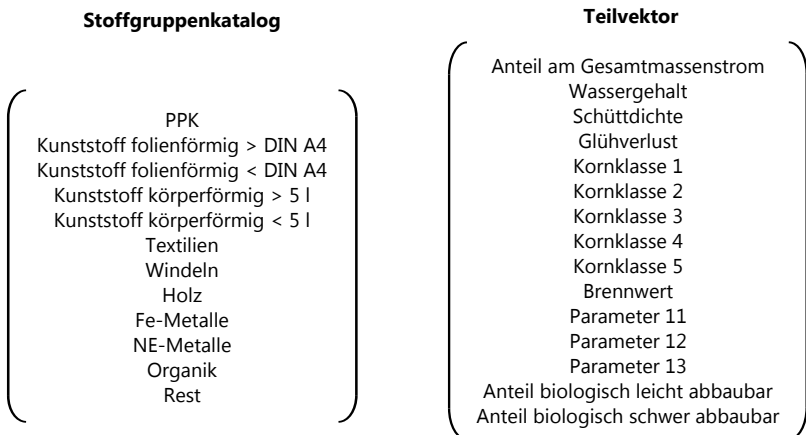


Bild 2.8: Strombeschreibung der Abfallstoffströme in [Bey02]

$$-\frac{d(m_v a_i)}{dt} = \text{div}[m_v a_i \mathbf{v}_i] - \text{div}[D_i \text{grad}(m_v a_i)] - G_i \quad (2.1)$$

mit

m_v : volumenbezogene Teilchenmasse,

a_i : Massenanteil der i -ten Teilchenklasse im betrachteten Volumenelement,

\mathbf{v}_i : Geschwindigkeit der Teilchen der i -ten Klasse,

$m_v a_i \mathbf{v}_i$: konvektiver Massenstrom der i -ten Klasse im Volumenelement,

D_i : Diffusionskoeffizient der i -ten Klasse,

$D_i \text{grad}(m_v a_i)$: diffusiver Massenstrom der i -ten Klasse im Volumenelement,

G_i : Änderung der Masse der i -ten Klasse im betrachteten Volumenelement durch Agglomerieren oder Zerteilen.

Es handelt sich hierbei um ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem für die N Teilchenklassen ($i = 1, 2, \dots, N$), welches sich ohne Vereinfachungen kaum lösen lässt [Sch10]. Aufgabe der Modellierung ist es, die Vereinfachungen so vorzunehmen, dass das Wesentliche eines Prozesses widergegeben wird.

Für die Fließschemasimulation speziell von Altpapiersortieranlagen besteht Bedarf an Modellen der Siebklassierung, automatischen Klaubung, Handklaubung sowie der Paperspikoprozesse (siehe Abschnitt 2.1). Für die Siebklassierung und die automatische Klaubung sind in der Literatur allgemeine Modelle verfügbar. Sie werden im Folgenden vorgestellt.

Zur Modellierung der Siebklassierung gibt es eine Vielzahl an Arbeiten [Sch10]. Die Schwierigkeit der Modellierung der Siebklassierung liegt aber darin, dass viele Einflussgrößen auf die Prozesse wirken. Daher ist bis heute kein Modell zur Berechnung der durchgesetzten Massenströme verfügbar, das sowohl physikalisch begründet als auch praktisch brauchbar ist [Sch10, Sti09]. Physikalisch begründete Modelle basieren beispielsweise auf der Dynamik und Durchtrittswahrscheinlichkeit von Einzelkörnern und gehen von ideal kugelförmigen Körnern aus [Sch10, Sti09].

In praktischen Anwendungen ist es üblich, Klassierprozesse empirisch durch die sogenannte Trenngradkurve zu charakterisieren [DIN 9267-4]. Dabei beschreibt der Trenngrad T für eine bestimmte Teilchengröße die Ausbringung ins Grobgut [Bun12]. Anders formuliert gibt der Trenngrad die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Teilchen einer bestimmten Größe die Klassiermaschine im Grobgutstrom verlässt [KS12]. Bild 2.9 zeigt ein Beispiel einer Trenngradkurve mit ihrer Berechnungsgleichung.

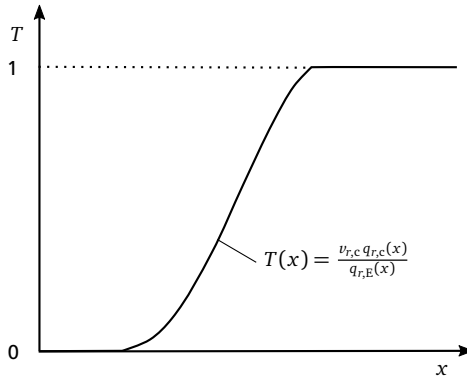


Bild 2.9: Beispiel einer Trenngradkurve $T(x)$ eines Siebklassierprozesses mit Berechnungsgleichung; $v_{r,g}$: relativer Anteil der groben Fraktion, $q_{r,g}(x)$: Verteilungsdichtefunktion der groben Fraktion, $q_{r,E}(x)$: Verteilungsdichtefunktion des einfließenden Stoffstroms, x : Teilchendurchmesser oder Äquivalentdurchmesser einer Kugel; nach [DIN 9267-4]

Auf Basis von experimentell ermittelten Trenngradkurven kann eine empirische Modellierung einer Siebklassierung erfolgen. Ziel ist es dabei, die Trenngradkurve durch einen mathematischen Ausdruck zu approximieren [Bun12]. Als Approximationsfunktionen werden in der Literatur beispielsweise die ROSIN-RAMMLER-SPERLING-BENNETT(RRSB)-Verteilungsfunktion oder Trennfunktionen von ROGERS, HATCH und MULAR sowie KARRA vorgeschlagen [Bun12, Rog82, KS12].

Verglichen mit der Siebklassierung werden für die automatische Klaubung nur wenige Modelle angegeben. Das Modell von [RK05] beschreibt die automatische Klaubung durch drei Teilprozesse: Erkennen (1), Trennen (2) und Austragen (3) (siehe Bild 2.10). Die Einzelmodelle der drei Teilprozesse werden zu einem Gesamtmodell für die Trennfunktion F gekoppelt

$$F(e_1, e_2, e_3) = F_1(e_1)F_2(e_2)F_3(e_3) \quad (2.2)$$

mit
 e : Trennmerkmal.

In [Bey02] wird die automatische Klaubung hingegen durch eine stoffgruppenspezifische Ausbringung modelliert. Pro Stoffgruppe k wird der durch die automatische Klaubung ausgebrachte Massenstrom $\dot{m}_{A,k}$ wie folgt berechnet [Bey02]

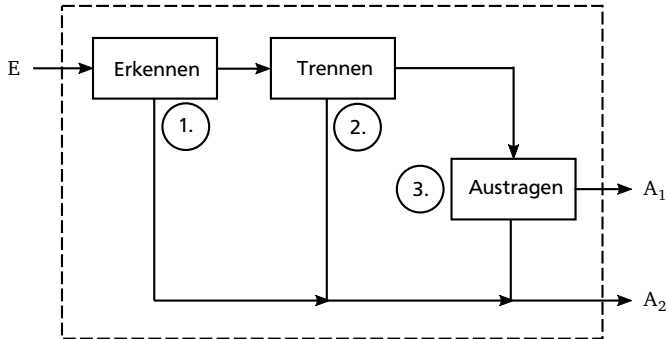


Bild 2.10: Ersatzmodell der automatischen Klaubung nach [RK05]; E: einfließend, A: ausfließend

$$\dot{m}_{A,k} = p_k \dot{m}_{E,k} \quad (2.3)$$

mit

p_k : Faktor der Ausbringung der Stoffgruppe k ,

$\dot{m}_{E,k}$: Massenstrom des einfließenden Stoffstroms der Stoffgruppe k .

Dieses empirische Modell ist für beliebige Prozesse und beliebige Stoffgruppen universell einsetzbar [Bey02] und entspricht der Definition eines Black-Box-Modells gemäß [Sch95]. Es lässt sich daher auch auf die Handklaubung oder die Paperspikeprozesse anwenden. Sein Nachteil ist, dass es keine Aussagen über das innere Verhalten eines Prozesses macht [Sch95].



3 Beschreibung der Stoffströme

Die Entwicklung einer Beschreibung für die Stoffströme in Altpapiersortieranlagen erfolgt auf Basis der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Arbeiten, welche die Zusammensetzung der Feststoffe in einem Abfallgemisch mittels Stoffgruppen beschreiben und die Stoffgruppen wiederum durch Eigenschaften charakterisieren. Die Grundstruktur der entwickelten Stoffstrombeschreibung ist in Bild 3.1 dargestellt.

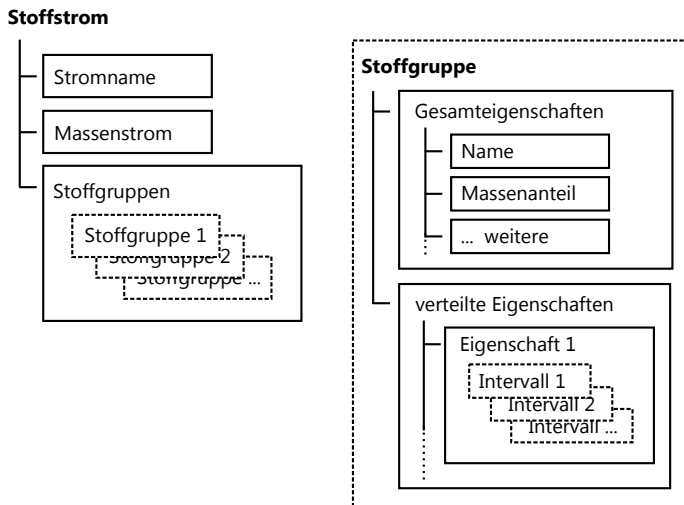


Bild 3.1: Grundstruktur der Stoffstrombeschreibung für die Altpapiersortierung

Da fluide Phasen für die Modellierung der Altpapiersortierung nicht relevant sind, setzt sich der Altpapierstrom nur aus Feststoffen unterschiedlicher Stoffgruppen zusammen. Die charakterisierenden Eigenschaften sind in Gesamteigenschaften und verteilte Eigenschaften gegliedert, wobei die verteilten Eigenschaften durch Intervalle strukturiert werden.

In den folgenden Abschnitten werden Stoffgruppen und Eigenschaften für die Fließschemasimulation der Altpapiersortierung konkretisiert.

3.1 Stoffgruppen

Die Konkretisierung der Stoffgruppen wird unter Berücksichtigung folgender Fragen durchgeführt:

- Ist bekannt oder ist zu erwarten, dass ein oder mehrere Grundprozesse der Altpapiersortierung auf eine Stoffgruppe anders als auf die übrigen Stoffgruppen einwirken?
- Wird eine Stoffgruppe in der europäischen Liste der Altpapier-Standardsorten DIN EN 643 [DIN EN 643] bei den für die Altpapiersortierung relevanten Sorten 1.11.00, 1.04, 1.02.00 explizit genannt?
- Lassen sich die gewählten Stoffgruppen sinnvoll zu übergeordneten Gruppen zusammenfassen oder ggf. weiter unterteilen, sodass die zu entwickelnden Simulationswerkzeuge flexibel einsetzbar sind?
- Sind die gewählten Stoffgruppen zu anderen Untersuchungen im Bereich der Altpapiersortierung, insbesondere zu Arbeiten der Gesamtmodellierung des Altpapierkreislaufs, wie bspw. [TM15] und [WP10], kompatibel?
- Weist eine Stoffgruppe ein hohes Störpotential für die Altpapiersortierung auf?
- Sind die Stoffgruppen bei einer händischen Sortieranalyse von Altpapierproben (siehe Abschnitt 5.3) mit vertretbarem Aufwand zu unterscheiden?

Unter diesen Gesichtspunkten wird ein Stoffgruppenkatalog erstellt, der in Summe 18 Stoffgruppen umfasst¹. Er wird im Folgenden zusammenfassend vorgestellt. Dabei ist zu jeder Stoffgruppe eine ergänzende Beschreibung (*B.*) und das Hauptkriterium für die Aufnahme in den Katalog (*K.*) aufgeführt.

¹ Die Erstellung erfolgte in Abstimmung mit L. TEMPEL in dem Forschungsprojekt [TM15].

Zeitungen (Z)

B. enthalten journalistische Artikel; Einzelseiten bis vollständige Zeitungen; keine Seitenausschnitte

K. in den Sortenbeschreibungen zu 1.11.00 und 1.02.00 genannt

Illustrierte und Magazine (IM)

B. vollständige Hefte

K. in den Sortenbeschreibungen zu 1.11.00 und 1.02.00 genannt

Werbedruck (Wd)

B. Prospekte und Flyer, die Beschreibungen von Waren und Dienstleistungen enthalten

K. ähnliche stoffliche Eigenschaften wie Zeitungen und Illustrierte, allerdings andere mechanische Eigenschaften, weil üblicherweise geringe Seitenanzahl

Bücher (B)

B. als Taschenbuch oder mit festem Einband; auch Kataloge mit festem Einband

K. Kompatibilität zu anderen Untersuchungen im Bereich der Altpapiersortierung

Papiere weiß, hell (Pw)

B. Schreib- und Büropapiere aus weißem oder sehr hellem Fasermaterial

K. sehr hochwertiger Sekundärrohstoff für den Altpapierkreislauf

Papiere grau, gelblich (Pgr)

B. Schreib- und Büropapiere aus grauem oder gelblichem Fasermaterial

K. gleiche mechanische Eigenschaften wie Stoffgruppe Pw, aber weniger hochwertiger Rohstoff für den Altpapierkreislauf

gefärbte grafische Papiere (Pge)

B. Schreib- und Büropapiere aus durchgefärbtem Fasermaterial

K. in Sorte 1.11.00 unerwünscht

Wellpappen braun (Wb)

B. mit zwei braunen Deckschichten

K. Wellpappen in den Sortenbeschreibungen zu 1.04 genannt und in Sorte 1.11.00 unerwünscht; im Vergleich zu Wellpap-

pen mit weißen Deckschichten im Altpapierstrom einfacher optisch zu erkennen

Wellpappen weiß (Ww)

B. mit einer oder zwei weißen Deckschichten

K. Wellpappen in den Sortenbeschreibungen zu 1.04 genannt und in Sorte 1.11.00 unerwünscht; im Vergleich zu Wellpappen mit braunen Deckschichten im Altpapierstrom schwerer optisch zu erkennen

Karton und Pappe grau, braun und gefärbt (Kgr,b,ge)

B. mit mindestens einer grauen, braunen oder durchgefärbten Lage; auch Faserguss

K. hohe Biegesteifigkeit; in Sorte 1.11.00 unerwünscht

Karton weiß, gelb, hell (Kw,g,h)

B. Faserstoff vollständig weiß, gelblich oder hell

K. hohe Biegesteifigkeit; nur bedingt für Sorte 1.11.00 geeignet

sonstige Verpackungspapiere (Vs)

B. Verpackungspapiere, die nicht durch andere Stoffgruppen abgedeckt sind

K. Kompatibilität zu anderen Untersuchungen im Bereich der Altpapiersortierung; meist in Sorte 1.11.00 unerwünscht

Hygienepapiere (H)

B. saugfähige Papiere für hygienische Zwecke

K. falls so verunreinigt, dass von ihnen Gesundheitsgefährdung ausgeht, unzulässiges Material gemäß [DIN EN 643]

Papiere, Pappen, Karton stark verschmutzt (PPKv)

B. Großteil der Altpapierobjektoberfläche verschmutzt

K. hohes Störpotential; unter Umständen unzulässiges Material gemäß [DIN EN 643]

sonstige ungeeignete Papiere, Pappen, Karton (PPKu)

B. sonstige Bestandteile gemäß Definition in [DIN EN 643], die nicht durch andere Stoffgruppen abgedeckt sind

K. Bestandteil der unerwünschten Materialien, für die in den Sortenbeschreibungen zu 1.11.00, 1.04 und 1.02.00 Maximalanteile angegeben sind

papierfremde Bestandteile (pf)

B. gemäß Definition in [DIN EN 643]

K. Maximalanteile in den Sortenbeschreibungen zu 1.11.00, 1.04 und 1.02.00 angegeben

gemischte Objekte (g)

B. bestehen aus Objekten verschiedener Stoffgruppen, die sich nicht einfach mechanisch auftrennen lassen

K. keine eindeutige Zuordnung zu einer der anderen Stoffgruppen möglich

Sortierrest (S)

B. Siebdurchgang eines Sortiertischs mit runden Sieböffnungen im Durchmesser 110 mm

K. Aufwand der händischen Sortieranalyse reduzieren

3.2 Eigenschaften

In diesem Abschnitt werden Stoffstromeigenschaften festgelegt, die neben dem Massenanteil in einer Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen berücksichtigt werden sollten. In Anbetracht der Heterogenität des Stoffs Altpapier wird die Vereinfachung getroffen, in die Stoffstrombeschreibung nur Eigenschaften aufzunehmen, die auch in die Modelle der Grundprozesse Eingang finden.

Zunächst wird daher in Tabelle 3.1 eine Liste mit Stoffeigenschaften, die möglicherweise einen Einfluss auf die Grundprozesse ausüben, erstellt. Dabei werden Informationen aus dem Kapitel 2.1 und Überlegungen zur Modellierung der Grundprozesse (siehe Kapitel 6) zusammengefasst. Da bei der Modellierung der Grundprozesse Vereinfachungen vorgenommen werden müssen, wird aus der Liste nur die Teilchengröße in Form einer verteilten Eigenschaft in ein Modell eines Grundprozesses einbezogen (siehe Kapitel 6.3). Deshalb wird auch in der Stoffstrombeschreibung nur diese Eigenschaft mitgeführt. Die damit für diese Arbeit vollständig konkretisierte Beschreibung ist in Bild 3.2 dargestellt.

Der modulare Aufbau der Stoffstrombeschreibung ermöglicht es aber, die Eigenschaftsliste in zukünftigen Untersuchungen zu ergänzen. Im Sinne einer ganzheitlichen Modellierung des Altpapierkreislaufs können neben Eigenschaften, die die Prozesse der Altpapiersortierung beeinflussen, auch Eigenschaften ergänzt werden, die für die Altpapieraufbereitung in der Suspension oder die Papierherstellung eine Rolle spielen.

Tabelle 3.1: Stoffeigenschaften mit möglichem Einfluss auf die Grundprozesse der Altpapiersortierung

Stoffeigenschaft	(möglicher) Einflussfaktor auf
Teilchengröße	Siebklassierung, Handklaubung, automatische Klaubung, Paperspikeprozesse
Teilchenform	automatische Klaubung (Austragen)
Biegesteifigkeit	Siebklassierung, Paperspikeprozesse
Durchstoßfestigkeit	Paperspikeprozesse
Masse	Siebklassierung, automatische Klaubung (Austragen)
Zusammensetzung der Materialoberfläche	automatische Klaubung (Erkennen)
Art der Druckfarbe	automatische Klaubung (Erkennen)
Farbe	automatische Klaubung (Erkennen), Handklaubung
Bedruckungsanteil der Oberfläche	automatische Klaubung (Erkennen), Handklaubung

Altpapierstrom

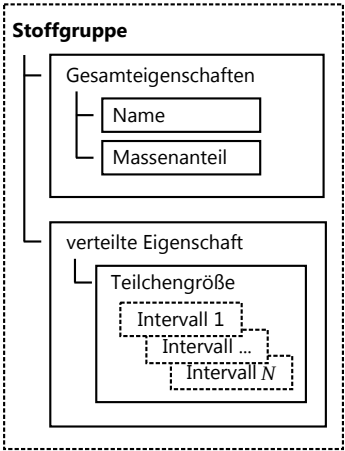
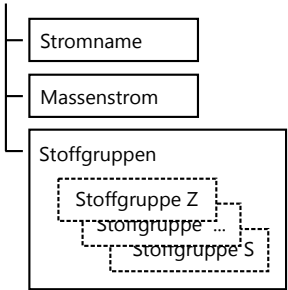


Bild 3.2: Konkretisierte Stoffstrombeschreibung für die Altpapiersortierung

4 Entwicklung einer Datenerfassungsmethode

Als Grundlage für die Modellierung der Prozesse der Altpapiersortierung sind Daten von Stoffströmen in industriellen Altpapiersortieranlagen zu erfassen. Die Messdaten müssen zum Zweck der Modellierung in Form der erarbeiteten Stoffstrombeschreibung (siehe Kapitel 3) vorliegen. Ziel dieses Kapitels ist es, eine Methode zur Erfassung der Daten zu entwickeln. Die Methode beinhaltet drei Teilaspekte: die Probenahme, die Probenanalyse und die Bestimmung der Massenströme.

4.1 Probenahme

Eine vollständige Untersuchung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen ist in dieser Arbeit nicht möglich. Denn es ist weder eine Methode verfügbar, mit der die benötigten Messdaten online gewonnen werden können, noch ist es wirtschaftlich, logistisch und zeitlich akzeptabel Stoffströme über einen längeren Zeitraum (bspw. länger als fünf Minuten) vollständig aufzufangen und zu analysieren. Aus diesem Grund wird das Verfahren der Stichprobenentnahme als Basis für die Datenerfassung gewählt.

Im Folgenden werden zunächst einige Grundlagen zur Probenahme aus Stoffsystemen zusammengefasst und anschließend die Methode für diese Arbeit erarbeitet.

4.1.1 Grundlagen

B. ZWIESELE fasst den Zweck der Probenahme aus Stoffsystemen folgendermaßen zusammen [Zwi05]:

„Die grundlegende Aufgabe der Probenahme ist es, eine Ausgangsmenge (statistischer Begriff: Grundgesamtheit), die in ihrer Gesamtheit aus ökonomischen und/oder technischen Gründen nicht vollständig untersucht werden kann, so zu reduzieren, dass aus der gewonnenen Teilmenge (statistischer Begriff: Stichprobe) zuverlässige Aussagen über die Ausgangsmenge gewonnen werden können.“

Die Entnahme von Proben aus der Grundgesamtheit muss nach dem Zufallsprinzip erfolgen, sodass keine systematischen Probenahmefehler auftreten. Dies bedeutet, dass jeder Teil der Grundgesamtheit mit gleicher Wahrscheinlichkeit in die Probe gelangen kann [Sch84].

Daraus ergibt sich für die Entnahme von Proben von einem Band, dass eine Einzelprobe den gesamten Querschnitt des Bandes berücksichtigen muss [Zwi05].

Bei der Beprobung von ruhendem Schüttgut besteht bei der technischen Umsetzung eine hohe Schwierigkeit, systematische Probenahmefehler auszuschließen. Hier kann die Überführung in einen Gutstrom Abhilfe schaffen, bspw. durch Greif-erfüllungen [Sch84].

Für die Beschreibung der Probenahme lassen sich unter der Voraussetzung, dass sie nach dem Zufallsprinzip erfolgt, die Methoden der mathematischen Statistik anwenden. Der Schätzwert für den Erwartungswert μ des zu bestimmenden, normalverteilten Prüfmerkmals b der Grundgesamtheit ist der arithmetische Mittelwert \bar{b} [Sch84]

$$\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} m_{p_i} b_i}{\sum_{i=1}^{N_p} m_{p_i}} \quad (4.1)$$

mit

m_{p_i} : Masse einer Einzelprobe,

N_p : Anzahl der Einzelproben.

Die Genauigkeit der Schätzung des Erwartungswerts lässt sich durch den Konfidenzbereich angeben [Sch84]

$$\bar{b} - t(S, M) s_{\bar{b}} \leq \mu \leq \bar{b} + t(S, M) s_{\bar{b}} \quad (4.2)$$

mit

$t(S, M)$: kritischer Wert der t -Verteilung,

$s_{\bar{b}}$: empirische Standardabweichung des Mittelwerts,

wobei

$S = 1 - \alpha$: statistische Sicherheit,

α : Irrtumswahrscheinlichkeit,

$M = N_p - 1$: Anzahl der Freiheitsgrade.

Der Konfidenzbereich schließt in $100 \cdot (1 - \alpha) \%$ aller Stichproben den wahren Wert des Prüfmerkmals ein [SH06].

Für die empirische Standardabweichung des Mittelwerts $s_{\bar{b}}$ gilt [Sch84]

$$s_{\bar{b}} = \frac{s}{\sqrt{N_p}}, \quad (4.3)$$

wobei s der Schätzwert für die Standardabweichung der Merkmalswerte ist. Für eine geringe Anzahl an Einzelproben bestimmt sich s nach [KK51, Sch84]

$$s = \frac{(\frac{2}{N_p})^{1/2} \Gamma(\frac{N_p}{2})}{\Gamma(\frac{N_p-1}{2})} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} m_{p_i} (b_i - \bar{b})^2}{(N_p - 1) \sum_{i=1}^{N_p} m_{p_i}}} \quad (4.4)$$

mit

Γ : Gammafunktion.

Mittels der mathematischen Statistik lässt sich auch zeigen, dass die zu entnehmende Probenmasse umso größer sein muss, je [Ras05]:

- heterogener der Stoffbestand,
- größer der Stoff,
- größer die Grundgesamtheit,
- schlechter die Grundgesamtheit durchmischt ist,
- zuverlässiger ein Prüfmerkmal bestimmt werden soll.

4.1.2 Methode

Die Beprobung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen ist durch folgende Schwierigkeiten gekennzeichnet:

1. schlechte Zugänglichkeit möglicher Probenentnahmestellen,
2. Betreiber von industriellen Altpapiersortieranlagen wünschen möglichst geringe Störungen des Betriebs durch die Probenentnahme,

-
3. hohe Heterogenität und geringe Schüttdichte des Altpapiers sowie großflächige Bestandteile im Altpapier erfordern Proben von großem Volumen, welche schlecht zu handhaben sind,
 4. starke Schwankungen des Durchsatzes und der Zusammensetzung.

Bei der Erarbeitung der Methode werden diese Schwierigkeiten berücksichtigt. Aufgrund der Schwierigkeiten Nr. 1 und 2 werden vier verschiedene Verfahren der Probenentnahme vorgesehen:

- Auffangen,
- Abräumen vom stehenden Band,
- Entnahme aus einem Bunker,
- Entnahme aus einem Haufwerk.

Favorisiert werden die Verfahren Auffangen und Abräumen, da diese technisch einfacher durchzuführen sind, weniger anfällig für systematische Probennahmefehler sind (siehe Abschnitt 4.1.1) und die Proben zusätzlich der Bestimmung des Massenstroms dienen können (siehe Abschnitt 4.3). Falls diese Verfahren nicht angewendet werden können, kommt die Probenentnahme aus einem Bunker oder Haufwerk zum Einsatz.

Die Schwierigkeiten Nr. 3 und 4 werden dadurch berücksichtigt, dass pro Probenentnahmestelle mehrere Einzelproben genommen werden, die zur Gewährleistung der Handhabbarkeit allerdings im Volumen begrenzt sind. Probenbehälter der Abmaße $0,6\text{ m} \cdot 0,8\text{ m} \cdot 0,3\text{ m}$, die mit Altpapier gefüllt sind, können von zwei Personen gemeinsam noch verhältnismäßig gut gehandhabt werden. Gleichzeitig kommen Objekte mit Abmaßen über $0,6\text{ m} \cdot 0,8\text{ m}$ in den beprobten Altpapierströmen nur selten vor und ihre Analyse kann daher ohne großen Aufwand direkt am Ort der Probenahme erfolgen (siehe Abschnitt 5.3). Das Volumen einer Einzelprobe wird auf maximal das Zweifache des Probenbehältervolumens ($2 \cdot 0,6\text{ m} \cdot 0,8\text{ m} \cdot 0,3\text{ m}$) beschränkt.

Bei Stoffströmen, bei denen nicht damit zu rechnen ist, dass relativ große Objekte enthalten sind, werden nur Probenbehälter der Abmaße $0,35\text{ m} \cdot 0,65\text{ m} \cdot 0,37\text{ m}$ eingesetzt, die auch gefüllt von einer Person alleine gehandhabt werden können. Pro Einzelprobe beträgt das Volumen in diesem Fall ebenfalls maximal das zweifache Volumen eines Behälters.

Technisch werden die gewählten vier Verfahren der Probenentnahme folgendermaßen umgesetzt:

Das *Auffangen* einer Probe erfolgt entweder an der Abwurfstelle eines Förderbandes oder Handklaubeprozesses. An einer Bandabwurfstelle wird eine Plane genutzt und im laufenden Betrieb unter der Abwurfstelle platziert. Die Plane wird wieder entfernt, sobald ein ausreichend großes Probenvolumen auf der Plane liegt. Die Abmaße der Plane sind mit $6\text{ m} \cdot 9\text{ m}$ so gewählt, dass der Querschnitt des Stoffstroms vollständig erfasst wird. Bei einem Handklaubeprozess wird ein Auffangbehälter direkt an der Abwurfstelle aufgestellt.

Für das *Abräumen* einer Probe von einem Förderband wird dieses angehalten. Das Band wird über eine vorher festgelegte Länge und seine vollständige Breite abgeräumt.

Stoff, der in *Bunkern* mit einer Transportfunktion gelagert ist, wird ähnlich wie an Bandabwurfstellen beprobt. Es wird eine Plane unter dem Ausgang des Bunkers platziert und das Bunkerband anschließend um einen kleinen Abschnitt verfahren, sodass die Probe auf die Plane fällt. Um systematische Probenahmefehler zu vermeiden, werden die Einzelproben aus verschiedenen Bereichen des Haufwerks im Bunker entnommen.

Die Entnahme einer Probe aus einem *Haufwerk* erfolgt durch Unterstützung eines Radladers (siehe Bild 4.1 (1. Schritt)). Dieses Verfahren wird bei der Beprobung des Eingangsstoffs von Altpapiersortieranlagen eingesetzt, denn in allen untersuchten Anlagen wird der Eingangsstoff ohnehin durch einen Radlader in einen Altpapierstrom überführt. Die Altpapiermenge einer Radladerschaufel wird anschließend auf einer freien Fläche abgekippt (siehe Bild 4.1 (2. Schritt)). Sie wird mit Schaufeln von Hand geviertelt oder in maximal acht Teilmengen aufgeteilt (siehe Bild 4.1 (3. Schritt)), sodass das Volumen einer Teilmenge das als maximal definierte Volumen einer Einzelprobe unterschreitet. Eine Teilmenge wird zufällig als Probe ausgewählt.

4.2 Probenanalysegerät

An die Probenahme schließt sich die Probenanalyse gemäß dem Aufbau der entwickelten Stoffstrombeschreibung (siehe Kapitel 3) an. Es sind somit die Eigenschaften Massenanteil und Verteilung der Teilchengröße für alle festgelegten Stoffgruppen zu bestimmen.

Zum Testen der Probenanalyse werden rein händische Analysen mit 10 Einzelproben durchgeführt. Dafür werden die Proben zuerst nach Stoffgruppen sortiert und daraus die Massenanteile ermittelt. Anschließend werden die Teilmengen der Stoffgruppen mit Schablonen als Hilfsmitteln in fünf Teilchengrößenintervalle ein-

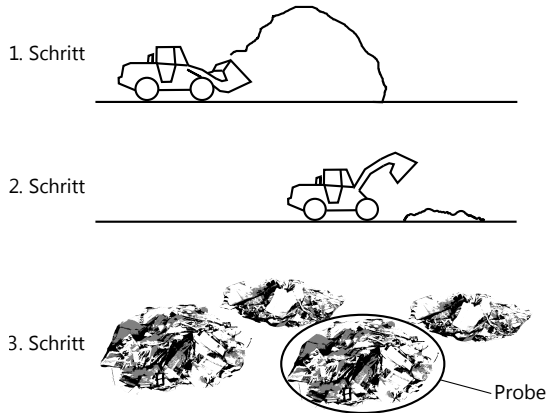


Bild 4.1: Ablauf der Probenentnahme aus einem Haufwerk

sortiert, um die Verteilung der Teilchengröße zu bestimmen. Dieser Test zeigt, dass die Analyse eines kleinen Einzelprobenvolumens von $0,35\text{ m} \cdot 0,65\text{ m} \cdot 0,37\text{ m}$ mit einer Probenmasse von ungefähr 10 kg durch eine Person bis zu drei Stunden dauern kann. Händische Probenanalysen sind demnach mit einem hohen Aufwand verbunden.

Dieser Abschnitt hat daher zum Ziel, ein Gerät zu entwickeln, das den zeitlichen und personellen Aufwand der Probenanalyse signifikant reduziert. Daraus folgt die Anforderung, dass das Gerät möglichst automatisch arbeiten soll. Gleichzeitig besteht aber auch die Anforderung, dass der Entwicklungsaufwand für das Gerät die zeitlichen und finanziellen Grenzen dieser Arbeit nicht überschreiten darf.

4.2.1 Funktionsstruktur

Zur Vereinfachung der Lösungsfindung wird eine Funktionsstruktur der Probenanalyse aufgestellt, die in Bild 4.2 gezeigt ist. Die erste Teilfunktion der Analyse ist es, die Probenbestandteile zu vereinzeln. Anschließend müssen die Eigenschaften der Einzelobjekte bestimmt werden. Zu den zu bestimmenden Eigenschaften gehören die Teilchengröße, die Masse und weitere Eigenschaften, die es ermöglichen, jedes Einzelobjekt zu einer der Stoffgruppen zuzuordnen. Durch die Teilfunktion Signalanalyse werden die geforderten Messdaten der Probe ausgegeben.

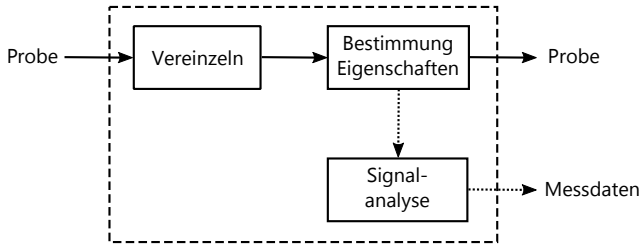


Bild 4.2: Funktionsstruktur der Probenanalyse

4.2.2 Konzept

Unter der Berücksichtigung der Anforderungen und der zu erfüllenden Funktionen wird ein Konzept für ein Probenanalysegerät erarbeitet. Das Probenanalysegerät wird im Folgenden als automatische Messanlage bezeichnet. In Bild 4.3 ist der Aufbau der automatischen Messanlage dargestellt. Er beinhaltet ein Zuführförderband, ein Lichtgitter, eine Durchlaufwaage, eine Farbkamera, eine Beleuchtungseinrichtung mit weißem und ultraviolettem (UV) Licht sowie Vorhänge zur Abschirmung des Umgebungslichts. Bild 4.4 zeigt die Umsetzung des Konzepts. Die Spezifikationen der Anlagenkomponenten sind im Anhang A.1 aufgeführt. Der Aufbau der Messanlage ist modular gehalten, sodass eine Ergänzung von Sensoren oder anderen Baugruppen einfach umgesetzt werden kann.

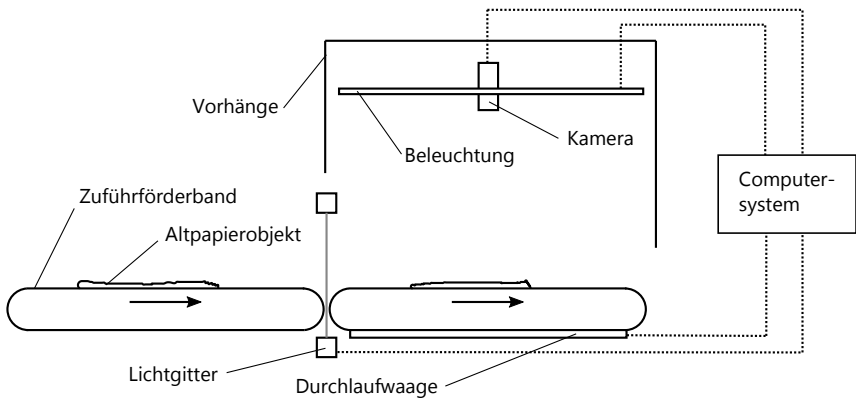


Bild 4.3: Aufbau der automatischen Messanlage für Altpapierproben

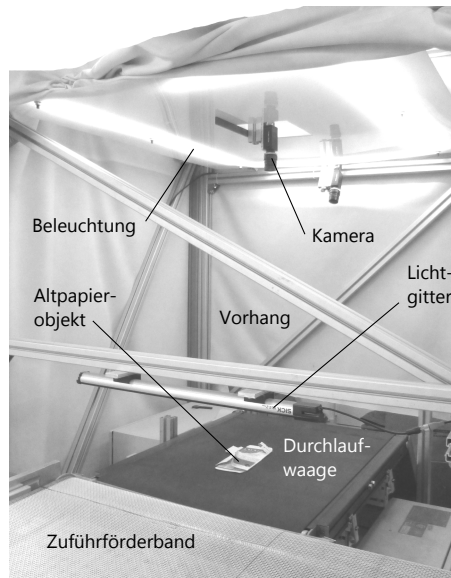


Bild 4.4: Foto der entwickelten automatischen Messanlage für Altpapierproben

Um den Entwicklungsaufwand in einem für diese Arbeit angemessenen Rahmen zu halten, wird davon abgesehen, die Funktion Vereinzeln zu automatisieren. Stattdessen legt eine Bedienungsperson die Bestandteile einer Probe einzeln und hintereinander auf das Zuführförderband. Mittels der Durchlaufwaage werden anschließend, ausgelöst durch das Lichtgitter, die Einzelmassen der Objekte automatisch erfasst. Für die Zuordnung der Objekte zu den festgelegten Stoffgruppen und die Bestimmung der Teilchengrößen werden Farbbilder aufgenommen und mittels des Verfahrens der Mustererkennung automatisch ausgewertet.

4.2.3 Mustererkennung

Die Mustererkennung umfasst drei Teilbereiche, deren Entwicklung nachfolgend im Detail beschrieben wird:

1. Bildsegmentierung,
2. Merkmalsextraktion,
3. Klassifikation.

Bildsegmentierung

Die Aufgabe der Bildsegmentierung ist es, ein Altpapierobjekt im Bild vom Hintergrund des Bildes abzutrennen [GWE09]. Dazu erfolgt zuerst eine Umwandlung des Farbbilds in ein Graustufenbild. Durch ein globales Schwellenwertverfahren werden danach alle Pixel, deren Grauwert unter einer gewählten Schwelle liegt, geschwärzt. Alle Pixel, die heller als die Grauwertschwelle sind, werden weiß gesetzt. Es ergibt sich ein Binärbild, in dem der Hintergrund schwarz und das Altpapierobjekt weiß ist. Durch das Entfernen von zusammenhängenden Bereichen mit geringer Pixelanzahl und einem Auffüllen von Löchern wird das Binärbild bereinigt. Zum Schluss wird das Binärbild mit dem unbearbeiteten Bild multipliziert, sodass im segmentierten Bild das Altpapierobjekt farbig ist und der Hintergrund vollständig schwarz.

Merkmalsextraktion

Von jedem Altpapierobjekt sind die Teilchengröße und weitere Eigenschaften zu extrahieren, die es in der anschließenden Klassifikation ermöglichen, das Altpapierobjekt zu einer der festgelegten Stoffgruppen zuzuordnen. In der Fachsprache der Mustererkennung wird üblicherweise anstelle des Begriffs Eigenschaft der Ausdruck Merkmal verwendet. Diese Konvention wird im Folgenden im Zusammenhang mit der Mustererkennung eingehalten.

Die Teilchengröße wird wie in Bild 4.5 dargestellt ermittelt. Die Länge x_1 und Breite x_2 werden an dem Rechteck gemessen, das das Objekt mit minimaler Fläche umschließt. Diese Definition der Teilchengröße wird zum einen gewählt, weil die Siebprozesse in der Altpapiersortierung üblicherweise rechteckige Löcher aufweisen, und zum anderen, weil Papierprodukte zu einem Großteil in rechteckiger Form vorliegen.

Eine Literaturrecherche ergibt, dass Farb- und Mustermerkmale als Grundlage für die Klassifikation von Altpapierobjekten vielversprechend sind [BC12, RHS⁺09b, RHB⁺12, RHS⁺10, RHS⁺12, RHS⁺11, RHS⁺09a, US 8,411,276 B2, RVG12]. Weitere Merkmale, hinsichtlich derer sich Altpapierobjekte unterscheiden sind außerdem die Form, die flächenbezogene Masse und das Vorkommen optischer Aufheller.

Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Algorithmen zur Merkmalsextraktion in der Software MATLAB, Version R2014a, der Firma THE MATHWORKS GMBH implementiert. Folgende Kriterien werden dabei berücksichtigt:

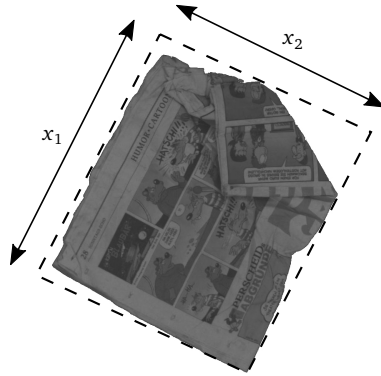


Bild 4.5: Definition der Länge x_1 und Breite x_2 eines Altpapierobjekts

- Da die Messanlage nicht vollständig vom Umgebungslicht abgeschildert werden kann, sollen die Merkmale robust gegenüber Beleuchtungsschwankungen sein.
- Die Merkmale sollen robust gegenüber möglichen kleinen Fehlern der Bildsegmentierung sein.
- Der Implementierungsaufwand soll nicht übermäßig hoch sein.

In Summe werden 25 Merkmalgorithmen implementiert, die in die Kategorien Masse, Form, Farbe, Muster und optische Aufheller eingeteilt werden können. Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht der Algorithmen. Ein Teil der Merkmale kann der Literatur entnommen werden, andere werden im Rahmen der Arbeit entwickelt. Beispielhaft werden im Folgenden drei entwickelte Merkmalgorithmen näher vorgestellt, alle übrigen Algorithmen werden im Anhang A.2 detailliert beschrieben.

In Bild 4.6 sind der mittlere Farbton und die mittlere Färbssättigung unbedruckter Papierprodukte aufgetragen. Die Daten wurden durch Analyse von Beispielobjektbildern, die in dem Aufbau der Messanlage aufgenommen wurden, gewonnen. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Messpunkte unbedruckter Altpapierobjekte in der Ebene Farbton/Färbssättigung in einem relativ engen Band liegen, das sich in der gewählten Darstellung von Wellpappen in der linken oberen Ecke zu weißen Papierprodukten in der rechten unteren Ecke zieht. Außer bei den Wellpappen überlappen sich die Bereiche der unterschiedlichen Papierprodukte allerdings. Daher wird das Band in vier Papierfarbgebiete eingeteilt, braun, grau 2, grau 1 und weiß, deren Grenzen in Tabelle 4.2 angegeben sind.

Tabelle 4.1: Übersicht der Merkmalalgorithmen zur Klassifikation von Altpapierobjekten

Kategorie	Merkmal(e)
Masse	Masse flächenbezogene Masse
Form	Länge Breite Seitenverhältnis
Farbe	mittlere Farbsättigung Standardabweichung der Farbsättigung Flächenanteile der Farben braun, grau und weiß Standardabweichung der Standardabweichung der Farbsättigung Mittelwert der Standardabweichung des Farbtons Standardabweichung der Standardabweichung des Farbtons
Muster	mittlerer Kontrast Glätte 3. Moment Uniformität Entropie Kontrast (co-occurrence) Korrelation Energie Homogenität Flächenanteil mit regelmäßigem Text
optische Aufheller	Maß für Anteil optischer Aufheller

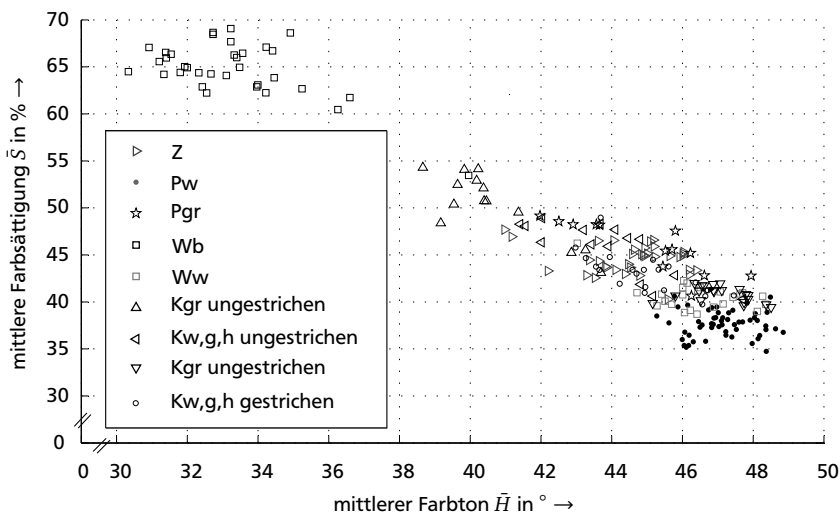


Bild 4.6: Farbton und Farbsättigung unbedruckter Papierprodukte

Tabelle 4.2: Grenzen der Papierfarbgebiete

Name	Abkürzung	Farbton H in $^{\circ}$	Farbsättigung S in %
braun	b	29,0 bis 37,5	59,0 bis 70,0
grau 2	g2	36,0 bis 42,5	42,5 bis 57,0
grau 1	g1	42,5 bis 48,0	42,5 bis 50,0
weiß	w	42,0 bis 50,0	33,0 bis 42,5

Auf diesen Informationen aufbauend wird der Merkmalalgorithmus zur Berechnung der Flächenanteile der Farben braun, grau 2, grau 1 und weiß eines Altpapierobjekts erstellt. Durch den Algorithmus wird das Farbbild eines Altpapierobjekts, das bei weißem Licht aufgenommen wurde, zuerst vom RGB-Farbraum (rot, grün, blau) in den HSV-Farbraum (Hue, Saturation, Value) transformiert. Dabei wird die Standard-Transformation angewendet, wie sie z. B. in [GWE09] angegeben ist. Anschließend erfolgt eine Einteilung des Bildes in quadratische Fenster mit einer Kantenlänge von 6 mm (siehe in Bild 4.7 in schematischer Form). Für jedes Fenster l werden die arithmetischen Mittelwerte des Farbtons \bar{H}_l und der Farbsättigung \bar{S}_l berechnet

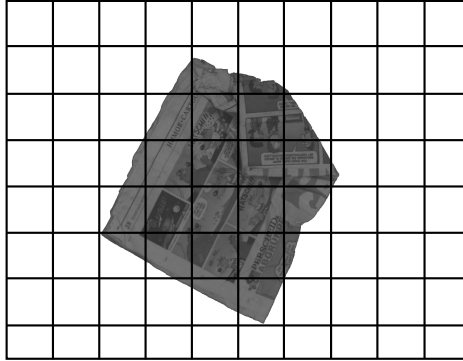


Bild 4.7: Einteilung eines Bildes in quadratische Fenster (schematisch)

$$\bar{H}_l = \frac{1}{N_{Pl}} \sum_{i=1}^{N_{Pl}} H_i, \quad (4.5)$$

$$\bar{S}_l = \frac{1}{N_{Pl}} \sum_{i=1}^{N_{Pl}} S_i \quad (4.6)$$

mit

H_i : Farbton des Pixels i ,

S_i : Farbsättigung des Pixels i ,

N_{Pl} : Anzahl der Vordergrundpixel im Fenster l .

Die *Flächenanteile* C der Farben braun (b), grau 2 (g2), grau 1 (g1) und weiß (w) eines Altpapierobjekts werden definiert als

$$C_b = \frac{N_b}{N_L}, \quad (4.7)$$

$$C_{g2} = \frac{N_{g2}}{N_L}, \quad (4.8)$$

$$C_{g1} = \frac{N_{g1}}{N_L}, \quad (4.9)$$

$$C_w = \frac{N_w}{N_L} \quad (4.10)$$

mit

N_b : Anzahl der Fenster mit dem Farbton und der Farbsättigung im Gebiet b,
 N_{g2} : Anzahl der Fenster mit dem Farbton und der Farbsättigung im Gebiet g2,
 N_{g1} : Anzahl der Fenster mit dem Farbton und der Farbsättigung im Gebiet g1,
 N_w : Anzahl der Fenster mit dem Farbton und der Farbsättigung im Gebiet w,
 N_L : Anzahl der Fenster, die Vordergrundpixel enthalten.

Da der Farbton und die Farbsättigung von der Helligkeit unabhängig sind, ist dieser Merkmalalgorithmus robust gegenüber Schwankungen der Beleuchtungsstärke.

Ein weiteres Merkmal, das zur Unterscheidung von Altpapierobjekten genutzt werden kann, ist die Bedruckung mit Text. Bspw. sind Zeitungen oder auch Büropapire oftmals mit regelmäßigem Text bedruckt, andere Objekte hingegen nicht (siehe bspw. Bild 4.8). In [GWE09] wird gezeigt, dass regelmäßig auftretende Muster mittels einer Größe, die als Korrelation bezeichnet wird, detektiert werden können. Bei der Bestimmung dieser Größe werden die Pixel eines Graustufenbildes mit ihren Nachbarpixeln verglichen und eine sogenannte Co-Occurrence-Matrix gebildet. Aus dieser Matrix wird die Korrelation berechnet (siehe Anhang A.2).

Bild 4.9 zeigt den Verlauf der Korrelation bei Variation des Abstandes zwischen den Nachbarpixeln für die in Bild 4.8 angegebenen Bildausschnitte. Bei dem Altpapierobjekt, das mit regelmäßigem Text bedruckt ist, ist ein periodischer Verlauf der Korrelation zu erkennen. Durch die Detektion der lokalen Extremwerte des Verlaufs der Korrelation lässt sich daher feststellen, ob ein Bildausschnitt mit regelmäßigem Text bedruckt ist.

Diese Erkenntnisse werden in einem Merkmalalgorithmus genutzt, der den Flächenanteil eines Altpapierobjekts, der mit regelmäßigem Text bedruckt ist, bestimmt. Dazu wird das Bild eines Altpapierobjekts zuerst vom RGB-Farbraum mit

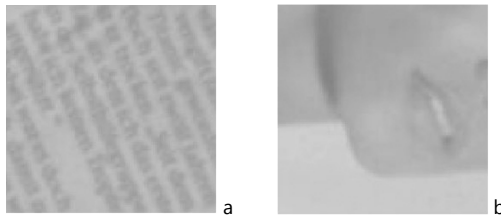


Bild 4.8: Bildausschnitte von Altpapierobjekten, die mit regelmäßigem Text bedruckt (a) und nicht mit regelmäßigem Text bedruckt sind (b)

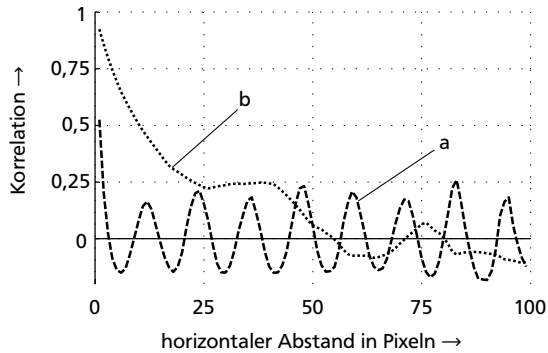


Bild 4.9: Verlauf der Korrelation für die Bildauschnitte in Bild 4.8

der Luminanz im NTSC-Farbraum (National Television Systems Committee) in ein Graustufenbild transformiert. Dieses Bild wird in quadratische Fenster mit einer Kantenlänge von 31 mm eingeteilt (siehe Schema in Bild 4.7). Für alle Fenster wird der Verlauf der Korrelation mit den im Anhang A.2 angegebenen Gleichungen für Pixelabstände von 0,3 bis 31 mm berechnet. Der *Flächenanteil mit regelmäßigem Text* C_t ist gleich

$$C_t = \frac{N_t}{N_L} \quad (4.11)$$

mit

N_t : Anzahl der Fenster mit regelmäßigem Text,

N_L : Anzahl der Fenster, die Vordergrundpixel enthalten.

Der dritte Merkmalalgorithmus, der an dieser Stelle vorgestellt wird, dient dazu, ein Maß für den Anteil an optischen Aufhellern im Papier zu bestimmen. Optische Aufheller absorbieren Licht im UV-Bereich des Spektrums und emittieren es im blauen Bereich des sichtbaren Spektrums [Lev99]. Als Konsequenz daraus wirkt Papier, das optische Aufheller enthält, auf den Betrachter heller als ohne diese Zugabe. Deshalb werden Papieren, bei denen die Helligkeit von besonderer Bedeutung ist, optische Aufheller gezielt zugesetzt.

Durch den Einsatz von optischen Aufhellern tritt gleichzeitig auch eine Farbtonverschiebung zwischen den Bildern eines Objekts, die unter weißem bzw. UV-Licht aufgenommen werden, auf. Der Merkmalalgorithmus nutzt daher, zusätzlich zu

dem bei weißem Licht erfassten Bild, ein Bild des selben Objekts bei UV-Licht. Beide Bilder werden in den HSV-Farbraum transformiert und in quadratische Fenster eingeteilt. Die Fensterlänge beträgt 12 mm. Für jedes Fenster l wird die Differenz des mittleren Farbtons $\Delta\tilde{H}_l$ unter Anwendung der Gleichung 4.5 ermittelt

$$\Delta\tilde{H}_l = |\tilde{H}_{UV_l} - \tilde{H}_{w_l}| \quad (4.12)$$

mit

H_{UV_l} : arithmetischer Mittelwert des Farbtons des Fensters l im Bild bei UV-Licht,
 H_{w_l} : arithmetischer Mittelwert des Farbtons des Fensters l im Bild bei weißem Licht.

Das Maß für den Anteil an optischen Aufhellern wird als Maximum der Farbtendifferenz $\Delta\tilde{H}_{\max}$ über alle Fenster $l = 1, \dots, N_L$ definiert

$$\Delta\tilde{H}_{\max} = \max(\Delta\tilde{H}_l). \quad (4.13)$$

Da der Effekt der optischen Aufheller in bedruckten Bereichen eines Altpapierobjekts abgeschwächt wird, wird dieses Maximum üblicherweise in unbedruckten Bereichen gefunden.

Nach der Implementierung der Merkmalalgorithmen stellt sich die Frage, wie gut diese zur Unterscheidung der festgelegten Stoffgruppen durch die Klassifikation geeignet sind. Zu diesem Zweck werden Testdaten erhoben, indem in industriellen Sortieranlagen 50 Altpapierproben genommen und händisch in die festgelegten Stoffgruppen unterteilt werden (siehe Kapitel 5). Die einzelnen Objekte werden anschließend unter Angabe der Stoffgruppe durch die Messanlage geschleust und ihre Merkmale extrahiert.

An dieser Stelle zeigt sich, dass einige Stoffgruppen nur sehr selten vorkommen (B, Pge), anhand der Bilddaten nur sehr schwer von anderen Stoffgruppen zu unterscheiden sind (H, PPKv, PPKu) oder eine große Bandbreite an unterschiedlichen Objekten enthalten können (pf, g). Eine automatische Klassifikation ist für diese Stoffgruppen nicht ohne Weiteres möglich, sodass die Entwicklung der Klassifikationsalgorithmen auf die übrigen Stoffgruppen beschränkt wird.

Von diesen Stoffgruppen werden jeweils 690 Objektdatensätze zufällig als Testdaten ausgesucht. Diese hohe Anzahl wird aufgrund der Vielfältigkeit der Altpapierobjekte gewählt. Die Datensätze werden statistisch ausgewertet und pro Merkmal wird ein Boxplot generiert, in dem das untere Quartil, der Median, das obere Quartil und das 1,5-Fache des Interquartilsabstands der Stoffgruppen aufgeführt sind.

Ein Beispiel eines solchen Diagramms ist in Bild 4.10 für das Merkmal Flächenanteil mit regelmäßigem Text dargestellt. Es verdeutlicht, dass dieses Merkmal nützlich ist, um ein Altpapierobjekt der Stoffgruppe Z, das mit viel Text bedruckt ist, zu detektieren. Zur Unterscheidung der Stoffgruppen Pw, Pgr, Ww, Karton grau und Kw,g,h werden allerdings keine Informationen geliefert.

Ein weiteres Beispiel ist für den Flächenanteil der Farbe braun in Bild 4.11 zu sehen. In diesem Diagramm stehen, wie zu erwarten, die Stoffgruppen Wb und Ww hervor.

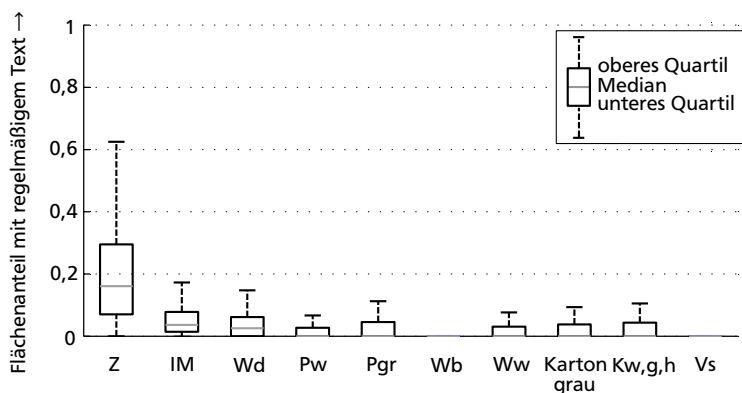


Bild 4.10: Boxplot für den Flächenanteil mit regelmäßigem Text C_t ohne Ausreißer

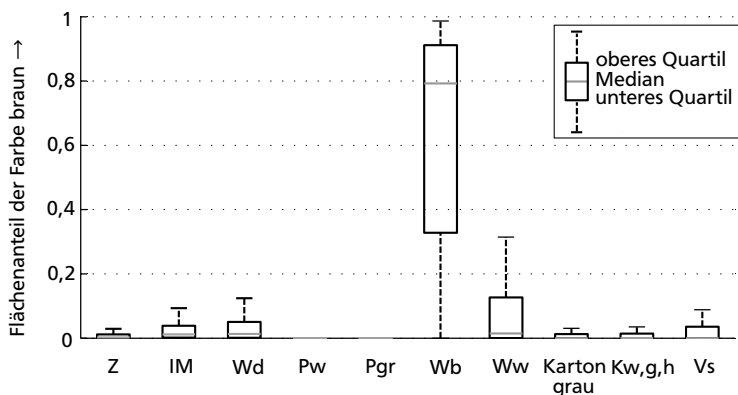


Bild 4.11: Boxplot für den Flächenanteil der Farbe braun C_b ohne Ausreißer

Die übrigen Boxplots werden an dieser Stelle nicht wiedergegeben, sondern im Anhang A.3 abgebildet. Die gesamte statistische Analyse lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Einerseits sind bei allen implementierten Merkmalen Unterschiede zwischen bestimmten Stoffgruppen oder Teilen von ihnen zu verzeichnen, die für die Klassifikation von Nutzen sind. Andererseits gibt es aber auch bei allen Merkmalen Stoffgruppen, deren Verteilungen sich in großen Bereichen überlappen, was zu Schwierigkeiten bei der Klassifikation führt.

Klassifikation

Der Datensatz der Merkmale eines Altpapierobjekts geht in die Algorithmen der Klassifikation mit dem Ziel ein, das Objekt zu einer der festgelegten Stoffgruppen zuzuordnen. Es werden fünf Klassifikationsalgorithmen ausgewählt, die in der Anwendungspraxis weit verbreitet und in der Software MATLAB vorimplementiert sind:

1. *k*-nächste-Nachbarn-Entscheider,
2. quadratische Diskriminanzanalyse,
3. Entscheidungsbaum,
4. Neuronales Netz,
5. support vector machine.

Diese Klassifikationsalgorithmen müssen mit Daten zuerst trainiert und danach validiert werden. Hierfür wird auf die 690 Testdatensätze pro Stoffgruppe, die im vorangegangenen Abschnitt erhoben wurden, zurückgegriffen.

In einem ersten Trainings- und Validierungszyklus werden von den Datensätzen pro Stoffgruppe 345 für das Training und 345 für die Validierung eingesetzt. Tabelle 4.3 listet die Ergebnisse dieses Zyklus. Bei der Kombination der Algorithmen wird ein Altpapierobjekt derjenigen Stoffgruppe zugeordnet, die bei den fünf Einzelalgorithmen am häufigsten auftritt¹. Für die Stoffgruppen Z, IM, Wd, Pw, Pgr und Wb liegt die Erfolgsrate der Klassifikation bei der Algorithmenkombination mit über 80 % relativ hoch, bei den restlichen Stoffgruppen mit teilweise unter 50 % allerdings relativ niedrig. Dieses Ergebnis hätte eine schlechte Probenanalysequalität zur Folge, sodass das Klassifikationssystem nach dem ersten Trainingszyklus nicht für den Einsatz in der Praxis geeignet ist.

¹ Treten Stoffgruppen gleichhäufig auf, was allerdings nur sehr selten zu beobachten ist, wird ein Altpapierobjekt derjenigen Stoffgruppe, die im Stoffgruppenkatalog (siehe Abschnitt 3.1) zuerst genannt ist, zugeordnet.

Tabelle 4.3: Erfolgsrate der Klassifikation des ersten Trainings- und Validierungszyklus in %

Stoffgruppe	Erkennungsalgorithmus Nr.					Kombination
	1	2	3	4	5	
Z	95	94	78	93	51	94
IM	89	89	84	87	49	91
Wd	79	85	74	79	19	84
Pw	85	93	83	84	34	88
Pgr	74	87	74	78	31	81
Wb	93	91	88	83	35	90
Ww	40	45	47	45	48	49
Karton grau	35	26	45	34	17	33
Kw,g,h	38	44	58	57	57	58
Vs	36	18	35	37	81	40

Die Hauptursache für die niedrigen Erfolgsraten nach dem ersten Training ist vermutlich, dass die implementierten Merkmale, wie oben gezeigt, nur eine begrenzte Fähigkeit zur Differenzierung der Stoffgruppen aufweisen. Um den Klassifikationserfolg auf ein praxistaugliches Maß zur erhöhen, müssten daher wahrscheinlich weitere Algorithmen für Bildmerkmale implementiert oder die Messanlage um Sensoren ergänzt werden. Zusätzlich ließen sich durch eine Optimierung der Klassifikationsalgorithmen Verbesserungen erzielen.

Dieses Vorgehen wäre allerdings mit einem zusätzlichen, nicht unerheblichen Entwicklungsaufwand verbunden. Es ist fraglich, ob dieser Aufwand im Hinblick auf den erwarteten einzusparenden Aufwand bei der Probenanalyse gerechtfertigt ist. Denn bei den Stoffgruppen Z, IM, Wd, Pw, Pgr und Wb ist der Klassifikationserfolg bereits relativ gut. Gleichzeitig bilden diese Stoffgruppen in den meisten der in dieser Arbeit zu untersuchenden Proben den Hauptanteil (siehe Anhang C). Es wird daher in einem zweiten Trainings- und Validierungszyklus untersucht, ob eine Modifizierung des Klassifikationssystems, bei der nur noch die Stoffgruppen Z, IM, Wd, Pw, Pgr und Wb betrachtet werden, zu einem ausreichenden Klassifikationserfolg führt.

Die Ergebnisse mit dem modifizierten System sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Die Erfolgsrate der Klassifikation liegt bei der Algorithmenkombination je nach Stoffgruppe zwischen 94 und 99 %. Dies ist eine sehr hohe Erfolgsrate und für die Probenanalyse in dieser Arbeit ausreichend genau, da auch bei einer händischen Probenanalyse Fehlklassifikationen nicht auszuschließen sind.

Tabelle 4.4: Erfolgsrate der Klassifikation des zweiten Trainings- und Validierungszyklus in %

Stoffgruppe	Erkennungsalgorithmus Nr.					Kombination
	1	2	3	4	5	
Z	97	95	86	93	82	96
IM	93	95	86	94	90	94
Wd	98	97	98	97	90	98
Pw	97	98	99	99	100	99
Pgr	91	92	91	93	93	94
Wb	99	98	97	98	99	99

4.2.4 Fazit

Die Zielstellung in diesem Abschnitts war die Entwicklung eines Probenanalysegeräts, mit der die Eigenschaften Massenanteil und Verteilung der Teilchengröße für alle festgelegten Stoffgruppen in einer Altpapierprobe möglichst automatisch bestimmbar sind.

Das fertiggestellte Gerät wird als automatische Messanlage bezeichnet und ermittelt die Verteilung der Teilchengröße durch Bildanalyse. Zusätzlich kann die Messanlage zwischen Objekten der Stoffgruppen Z, IM, Wd, Pw, Pgr und Wb selbsttätig unterscheiden. Der Analyseaufwand beträgt beim Einsatz der Anlage weniger als 1 Stunde pro 10 kg Probenmenge. Gegenüber einer rein händischen Probenanalyse, die bis zu 3 Stunden pro 10 kg Probenmenge dauern kann, stellt dies eine deutliche Reduzierung des Analyseaufwands dar.

Der Analyseaufwand könnte durch eine Automatisierung der Teilfunktion Vereinzeln und durch die Verbesserung der Mustererkennung weiter gesenkt werden.

4.3 Bestimmung der Massenströme

Zu einer vollständigen Beschreibung der Stoffströme in Altpapiersortieranlagen ist es notwendig, neben den Eigenschaften der einzelnen Stoffgruppen auch den Massenstrom anzugeben. Zur Bestimmung der Massenströme wird eine Methode entwickelt, die ähnlich wie die Probenahmemethode in Abhängigkeit der Gegebenheiten in einer Sortieranlage mit unterschiedlichen Verfahren arbeitet. Wenn möglich, wird die Massenstrombestimmung unmittelbar mit der Probenentnahme kombiniert. Folgende Verfahren werden vorgesehen:

1. Auffangen von Proben,
2. Abräumen von Proben vom stehenden Band,
3. Ballenverwiegung.

Beim ersten Verfahren, dem *Auffangen* von Proben, wird die Probenmasse m_p und das Zeitintervall zum Auffangen aller Objekte der Probe Δt gemessen. Der Massenstrom einer Einzelprobe i ist

$$\dot{m}_{p_i} = \frac{m_{p_i}}{\Delta t_i}. \quad (4.14)$$

Beim *Abräumen* von Proben vom stehenden Band wird die Probenmasse und die abgeräumte Förderbandlänge l_F gemessen. Zusätzlich wird die Fördergeschwindigkeit v_F des laufenden Bands bestimmt. Für den Massenstrom einer Einzelprobe i ergibt sich

$$\dot{m}_{p_i} = m_{p_i} \frac{v_F}{l_{F_i}}. \quad (4.15)$$

Sowohl für das Auffangen als auch das Abräumen wird mit den Massenströmen der Einzelproben \dot{m}_{p_i} der durchschnittliche Massenstrom \dot{m} als arithmetischer Mittelwert und seine empirische Standardabweichung $s_{\dot{m}}$ berechnet.

Für das Verfahren der *Ballenverwiegung* wird ein Stoffstrom über ein Zeitintervall Δt in einen separaten Ablageort (z. B. Bunker) geleitet und der gesammelte Stoff anschließend zu Ballen gepresst. Mit der Gesamtmasse der Ballen m_B lautet die Gleichung für den durchschnittlichen Massenstrom

$$\dot{m} = \frac{m_B}{\Delta t}. \quad (4.16)$$



5 Durchführung der Datenerfassung

Bei der Durchführung der Datenerfassung werden Proben in fünf industriellen Altpapiersortieranlagen genommen, die während der Untersuchungen normal betrieben werden. Die Möglichkeit eines Versuchsbetriebs besteht aus wirtschaftlichen Gründen nicht. Alle Anlagen verarbeiten Altpapier aus haushaltsnaher Sammlung und erzeugen als Hauptzielprodukt Deinkingware. Neben der Probenahme findet in den Sortieranlagen auch eine Bestimmung von Massenströmen statt. Die Ergebnisse dieses Kapitels sind im Anhang C tabellarisch aufgeführt.

5.1 Probenahme

Die Entnahme von Proben erfolgt in den Sortieranlagen nach der entwickelten Methode (siehe Abschnitt 4.1) und, sofern zugänglich, aus allen ein- und ausfließenden Strömen eines zu untersuchenden Trennprozesses. Falls einer der Stoffströme eines Trennprozesses nicht zugänglich ist, werden die Eigenschaften des fehlenden Stoffstroms im Rahmen der Modellierung berechnet (siehe Abschnitt 6.1). Pro Stoffstrom werden zwischen drei und sieben Einzelproben über einen Zeitraum zwischen 2 und 5 Stunden entnommen. Tabelle 5.1 listet die beprobten Trennprozesse.

5.2 Bestimmung der Massenströme

Von allen beprobten Strömen eines Trennprozesses wird außerdem der Massenstrom nach der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Methode bestimmt. Unter Umständen besteht bei einem zu untersuchenden Stoffstrom nicht die Möglichkeit, den Massenstrom zu ermitteln. Dies ist z. B. bei den einfließenden Stoffströmen aller betrachteten Grobsiebprozesse der Fall, die in allen Anlagen nur aus einem Haufwerk beprobt werden können. In diesen Fällen wird auf Daten des Anlagenbetreibers zu durchschnittlichen Massenströmen in der Anlage zurück gegriffen.

Tabelle 5.1: Liste der untersuchten Trennprozesse

Trennprozess	Ausführung	Eigenschaften
Grobsiebung 1	Ballistikseparator	Breite und Länge der Sieböffnungen: 250 mm bzw. 230 mm Anzahl der Siebdecks: 3 Siebfläche: 3·13,8 m ²
Grobsiebung 2	Ballistikseparator	Breite und Länge der Sieböffnungen: 180 mm bzw. 300 mm Anzahl der Siebdecks: 2 Siebfläche: 8,5 m ²
Grobsiebung 3	Scheibensieb	Breite und Länge der Sieböffnungen: 170 mm bzw. 300 mm Anzahl der Siebdecks: 1 Siebfläche: 9,7 m ²
Grobsiebung 4	Sternsieb	Breite und Länge der Sieböffnungen: 200 mm bzw. 350 mm Anzahl der Siebdecks: 2 Siebfläche: 16 m ²
Feinsiebung 1	Ballistikseparator	Breite und Länge der Sieböffnungen: 70 mm bzw. 120 mm Anzahl der Siebdecks: 1 Siebfläche: 9,4 m ²
Feinsiebung 2	Ballistikseparator	Breite und Länge der Sieböffnungen: 180 mm bzw. 100 mm Anzahl der Siebdecks: 1 Siebfläche: 5,2 m ²
Paperspikeprozess	Walzenausführung	Außendurchmesser: 1,1 m Abstand der Nägel am Außendurchmesser: 100 mm Abstand der Nagelreihen auf der Walze: 160 mm
automatische Klaubung 1	NIR- Spektroskopie	Abstand der Ausblasdüsen: 32 mm Maschinenbreite: 2 m
automatische Klaubung 2	NIR- plus VIS- Spektroskopie	Abstand der Ausblasdüsen: 32 mm Maschinenbreite: 2 m
Handklaubung 1	Hauptsortierung	6 Personen an 6 Bändern Bandgeschwindigkeit: 22 m/min Bandbreite: 1 m
Handklaubung 2	Nachsartierung	4 Personen an einem Band Bandgeschwindigkeit: 32 m/min Bandbreite: 1 m

5.3 Probenanalyse

Bild 5.1 zeigt das Ablaufschema der Probenanalyse. Sie wird an zwei Orten durchgeführt. Am Ort der Probenentnahme, dem Gelände der Sortieranlage, werden Objekte mit Abmaßen größer als 550 mm · 800 mm und stark verschmutzte Objekte aus den Proben abgetrennt und unmittelbar analysiert. Solche Objekte kommen in den Altpapierströmen nur selten vor und sind schlecht zu handhaben. Die übrigen Objekte einer Probe werden lose in ein oder zwei Wellpappenkisten verpackt. Dadurch ist sichergestellt, dass die Objekte beim Transport nicht durch Quetschen verformt werden. Die Analyse der Restproben erfolgt im Labor des FACHGEBIETS PAPIERFABRIKATION UND MECHANISCHE VERFAHRENSTECHNIK an der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DARMSTADT.

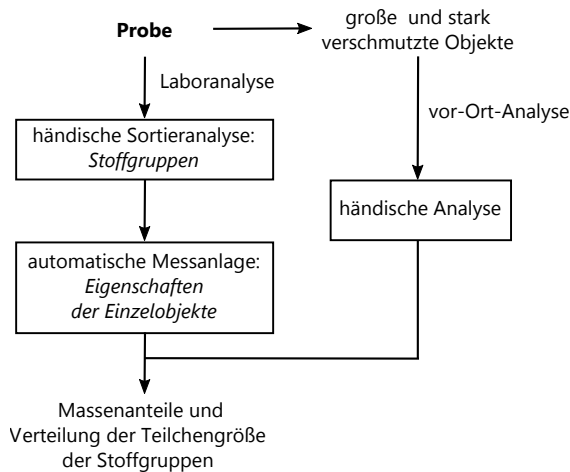


Bild 5.1: Ablaufschema der Probenanalyse

Die Laboranalyse ist nochmals in zwei Schritte unterteilt: eine händische Sortieranalyse und eine Analyse mittels der entwickelten automatischen Messanlage (siehe Abschnitt 4.2).

Die Aufgabe der händischen Sortieranalyse ist eine Unterteilung der Probe in die Stoffgruppen, die von der automatischen Messanlage nicht erkannt werden können. Vor der Fertigstellung der Mustererkennungsalgorithmen der Messanlage müssen daher alle Stoffgruppen händisch sortiert werden. Dies ist bei 26 Proben der Fall, bei denen die einzelnen Objekte unter Angabe der Stoffgruppe durch die Messanlage geschleust werden. Die von diesen Objekten gewonnen Bilder werden

zum Training und zur Validierung der Mustererkennungsalgorithmen eingesetzt (siehe Abschnitt 4.2.3).

Die Durchführung der händischen Sortieranalyse orientiert sich an praktischen Hinweisen aus [Bül06]. Insbesondere wird ein Zuordnungskatalog eingesetzt, der eine reproduzierbare und möglichst objektive Zuweisung zu den Stoffgruppen gewährleistet (siehe Anhang B). Außerdem erfolgt die Analyse auf einem Siebtisch, um den Sortieraufwand zu reduzieren. Der Tisch weist kreisförmige Löcher mit einem Durchmesser von 110 mm auf. Objekte mit einer kleineren Grundfläche fallen durch den Tisch und werden als Sortierrest zusammengefasst. Die Analysegenauigkeit wird durch dieses Verfahren nur in sehr geringem Maße beeinflusst, denn der Massenanteil des Sortierrests liegt üblicherweise deutlich unter 1 % (siehe Anhang C).

Mittels der automatischen Messanlage wird von allen Objekten einer Altpapierprobe die Masse und die Teilchengröße bestimmt. Nach der Fertigstellung der Mustererkennungsalgorithmen können zusätzlich Objekte der Stoffgruppen Z, IM, Wd, Pw, Pgr und Wb automatisch voneinander unterschieden werden und müssen somit in der händischen Sortieranalyse nicht mehr getrennt werden (siehe Abschnitt 4.2.3).

Aus den Messdaten aller Objekte einer Probe wird für alle Stoffgruppen $k = 1, \dots, 18$ die Stoffgruppeneigenschaft Massenanteil a_k ermittelt

$$a_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{O_k}} m_{O_{i,k}}}{\sum_{k=1}^{18} \sum_{i=1}^{N_{O_k}} m_{O_{i,k}}} \quad (5.1)$$

mit

$m_{O_{i,k}}$: Masse des i -ten Objekts der Stoffgruppe k ,

N_{O_k} : Anzahl der Objekte der Stoffgruppe k .

Außerdem wird für alle Stoffgruppen $k = 1, \dots, 18$ das Verteilungsdichtehistogramm der Teilchengrößen $\bar{q}_{3,k}(\bar{x}_z)$ mit der Masse als Mengenart berechnet [Sti09, DIN 9267-4]

$$\bar{q}_{3,k}(\bar{x}_z) = \frac{\Delta m_{z,k}}{m_{\text{ges},k} \Delta x_z} \quad (5.2)$$

mit

$$\bar{x}_z = \frac{x_{1_z} + x_{1_{z-1}}}{2}, \quad (5.3)$$

sowie

x_1 : Teilchenlänge (siehe Bild 4.5),

\bar{x}_z : mittlere Teilchenlänge im Intervall z ,

$\Delta m_{z,k}$: Teilmasse der Stoffgruppe k im Intervall z ,

m_{ges_k} : Gesamtmasse der Stoffgruppe k ,

Δx_z : Intervallbreite.

Hierbei werden auch die Daten von Objekten, die bereits am Ort der Probenentnahme erfasst wurden, berücksichtigt.

Anschließend werden aus allen analysierten Einzelproben, die einem Stoffstrom zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommen wurden, die arithmetischen Mittelwerte der Stoffgruppeneigenschaften ermittelt (Gleichung 4.1) und die Standardabweichung der Mittelwerte geschätzt (Gleichung 4.3). Hierbei wird die Unsicherheit der Analyse mit der automatischen Messanlage und der händischen Sortieranalyse gegenüber der Unsicherheit der Probenahme vernachlässigt.



6 Modellierung der Grundprozesse

Die Modellierung der Grundprozesse der Altpapiersortierung ist das Hauptziel dieser Arbeit. Wie im Abschnitt 2.2.2 erläutert, ist es die Aufgabe der zu erstellenden Modelle die aus- und einfließenden Stoffströme eines Prozesses durch Massenbilanzgleichungen zu korrelieren.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Methoden der Modellierung vorgestellt. Anschließend werden diese Methoden auf die einzelnen Grundprozesse angewendet.

6.1 Methoden

Die Modellierung der Grundprozesse erfolgt unter starken Vereinfachungen. Dies ist bedingt durch folgende Aspekte:

- Die meisten Grundprozesse der Altpapiersortierung sind wenig erforscht. Es werden in der Literatur zwar Einflussgrößen auf die Prozesse angegeben, aber deren genaue Wirkung wird nicht beschrieben (siehe Kapitel 2.1).
- Die Stoffströme sind sehr heterogen, sowohl in der Zusammensetzung als auch in der Teilchengrößenverteilung (siehe Kapitel 3 und 4).
- In dieser Arbeit ist eine Untersuchung der Grundprozesse nur in industriellen Sortieranlagen im Normalbetrieb möglich. Es steht weder eine Pilotanlage zur Verfügung, noch kann eine industrielle Anlage im Versuchsbetrieb untersucht werden. Dies bedeutet, dass bei der Datenerfassung keine Ausrüstungs- und Betriebsgrößen der Prozesse gezielt variiert werden können (siehe Kapitel 4).

Aus diesen Gründen wird bei der Modellierung ein Black-Box-Modell-Ansatz [Sch95] ohne zeitliche Abhängigkeiten gewählt, der im Folgenden als Grundmodell bezeichnet wird. Das Grundmodell ermöglicht es, alle Trennprozesse der Altpapiersortierung allgemein zu beschreiben, und wird für die einzelnen Prozesse konkretisiert. Somit sind die Prozessmodelle in einer Fließschemasimulation miteinander kompatibel.

Bei der Konkretisierung werden unter anderem Stoffgruppen zusammengefasst, die sich in einem Prozess gleich oder sehr ähnlich verhalten. Zusätzlich werden in manchen Fällen Stoffeigenschaften berücksichtigt, die einen Einfluss auf den Prozess ausüben.

Obwohl bei allen Grundprozessen der Altpapiersortierung erwartet wird, dass sie durch den Gesamtmassenstrom des einfließenden Stoffs beeinflusst werden, kann dieser Faktor bei der Konkretisierung der Modelle nicht miteinbezogen werden. Denn, wie bereits erwähnt, ist eine Datenerfassung unter Variation des Massenstroms nicht möglich.

Die konkretisierten Modelle enthalten Parameter, deren Anpassung anschließend mittels der erfassten Messdaten vorgenommen wird. Falls möglich, wird hierfür eine Bilanzausgleichsrechnung der Messdaten durchgeführt. Für die Parameteranpassung wird eine Software für Stoffflussanalysen, STAN, Version 2.5 der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT WIEN, INSTITUT FÜR WASSERGÜTE, RESSOURCENMANAGEMENT UND ABFALLWIRTSCHAFT, eingesetzt.

Die Stoffgruppe gemischte Objekte (g) wird bei der Parameteranpassung allerdings nicht berücksichtigt. Denn gemischte Objekte können sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein und somit müsste bei der Modellierung ihres Prozessverhaltens nochmals eine Unterteilung nach der Zusammensetzung vorgenommen werden. Dies würde aber bei der Datenerfassung den Aufwand der Probenanalyse erhöhen und gleichzeitig wird erwartet, dass die Modellparameter eine verhältnismäßig hohe Unsicherheit aufweisen würden.

6.2 Grundmodell

Bild 6.1 zeigt den Aufbau des Grundmodells. Einem Prozess werden Stoffströme zugeführt und dann bearbeitet, sodass Stoffströme ausfließen, deren Eigenschaften sich von den einfließenden Stoffströmen unterscheiden. Die Beschreibung der Stoffströme erfolgt durch die in Kapitel 3 entwickelte Stoffstrombeschreibung.

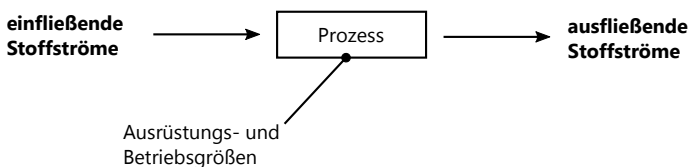


Bild 6.1: Aufbau des Grundmodells für die Altpapiersortierung

Unter der Vereinfachung eines stationären Prozessverhaltens lautet die Gesamtmas-
senbilanz für den Prozess

$$0 = \sum_{i=1}^{N_E} \dot{m}_i + \sum_{j=1}^{N_A} \dot{m}_j = \dot{m}_E + \dot{m}_A \quad (6.1)$$

mit

\dot{m} : Massenstrom,

Index i : Index der einfließenden Stoffströme,

Index j : Index der ausfließenden Stoffströme,

N : Anzahl der Stoffströme,

Index E: einfließend,

Index A: ausfließend.

Es wird angenommen, dass keine Umwandlung von Stoff in eine andere Stoffgrup-
pe stattfindet. Für die Massenbilanz pro Stoffgruppe $k = 1, \dots, 17$ ergibt sich folglich

$$0 = \sum_{i=1}^{N_E} \dot{m}_{i,k} - \sum_{j=1}^{N_A} \dot{m}_{j,k} = \sum_{i=1}^{N_E} \dot{m}_i a_{i,k} - \sum_{j=1}^{N_A} \dot{m}_j a_{j,k} \quad (6.2)$$

mit

a : Massenanteil (siehe Gleichung 5.1).

Die *grundlegende Modellgleichung* beschreibt den Zusammenhang zwischen den
einfließenden und austretenden Massenströmen der einzelnen Stoffgruppen $k =$
 $1, \dots, 17$ mittels des Modellparameters $p_{j,k}$

$$\dot{m}_{j,k} = p_{j,k} \sum_{i=1}^{N_E} \dot{m}_{i,k}. \quad (6.3)$$

Diese Gleichung stellt eine Erweiterung der Gleichung 2.3 aus [Bey02] um eine
beliebige Anzahl an einfließenden und ausfließenden Stoffströmen dar. Der Mo-
dellparameter $p_{j,k}$ gibt die Massenausbringung einer Stoffgruppe k in einen ausflie-
ßenden Stoffstrom j an. Zusammen mit Gleichung 6.2 ergibt sich, dass die Summe
der Modellparameter über alle austretenden Stoffströme pro Stoffgruppe gleich 1
ist

$$\sum_{j=1}^{N_A} p_{j,k} = 1. \quad (6.4)$$

Obwohl das durch Gleichung 6.3 beschriebene Grundmodell nur das von außen sichtbare Verhalten eines Prozesses abbildet, eignet es sich auch als Ansatz für Modelle, die Aussagen über das innere Verhalten eines Prozesses machen. Für solche Modelle können zusätzliche Gleichungen erstellt werden, die die Abhängigkeit des Modellparameters von bestimmten Größen angeben

$$p_{j,k} = f_{j,k}(c, d, \dots). \quad (6.5)$$

Hierdurch können bspw. Stoffeigenschaften, der Betriebszustand oder Ausrüstungsgrößen eines Prozesses bei der Modellierung berücksichtigt werden.

6.3 Siebklassierung

Bei der Siebklassierung in Altpapiersortieranlagen gibt es einen einfließenden Stoffstrom und zwei austretende Stoffströme: das Grob- und das Feingut (Index g bzw. f) (siehe Bild 6.2).

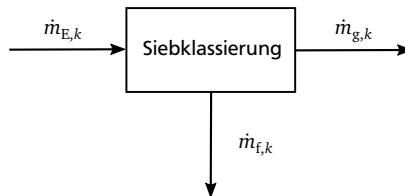


Bild 6.2: Modell der Siebklassierung

Die Anwendung der Gleichungen 6.3 und 6.4 des Grundmodells auf die Siebklassierung ergibt

$$\dot{m}_{g,k} = p_{g,k} \dot{m}_{E,k}, \quad (6.6)$$

$$\dot{m}_{f,k} = (1 - p_{g,k}) \dot{m}_{E,k}. \quad (6.7)$$

Die in der Literatur und Praxis übliche Funktion zur Charakterisierung von Siebklassierprozessen, die Trenngradkurve $T(x)$ (siehe Abschnitt 2.2.2), wird nun in das Modell eingefügt, um das Prozessverhalten mit einem höheren Detaillierungsgrad abzubilden. Die Trenngradkurve beschreibt für eine Teilchengröße x , welcher Anteil des einfließenden Stoffstroms nach der Klassierung im Grobgut enthalten ist [Bun12, Sti09]

$$T(x) = \frac{\nu_{3,g} q_{3,g}(x)}{q_{3,E}(x)}, \quad (6.8)$$

mit

$$\nu_{3,g} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_E}, \quad (6.9)$$

wobei

$\nu_{3,g}$: Grobgutmassenanteil,

$q_{3,E}(x)$: Verteilungsdichte der Teilchengrößen des einfließenden Stoffstroms,

$q_{3,g}(x)$: Verteilungsdichte der Teilchengrößen des Grobguts.

Diese Zusammenhänge sind in Bild 6.3 dargestellt. Umstellen und Integration der Gleichung der Trenngradkurve von der minimalen Teilchengröße x_{\min} bis zur maximalen Teilchengröße x_{\max} liefert [Sti09]

$$\nu_{3,g} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} T(x) q_{3,E}(x) dx. \quad (6.10)$$

Werden die Stoffgruppen eines Altpapierstroms einzeln betrachtet, gilt

$$\nu_{3,g,k} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} T_k(x) q_{3,E,k}(x) dx = \frac{\dot{m}_{g,k}}{\dot{m}_{E,k}}. \quad (6.11)$$

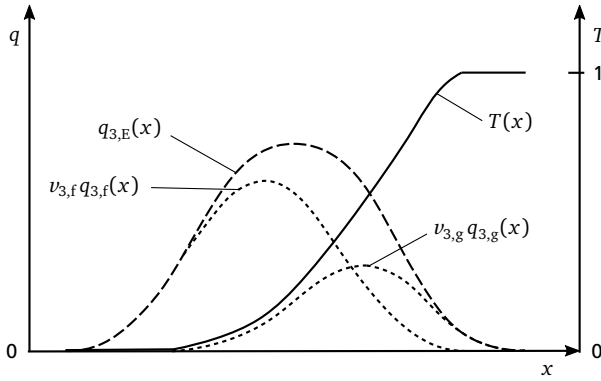


Bild 6.3: Grafische Darstellung der Zusammenhänge zur Berechnung der Trenngradkurve $T(x)$

Ein Vergleich der Gleichung 6.11 mit der Gleichung 6.6 zeigt, dass der Grobgutmassenanteil dem in dieser Arbeit definierten Modellparameter $p_{g,k}$ entspricht. Die Trenngradkurve ist somit folgendermaßen mit der grundlegenden Modellgleichung 6.6 verknüpft

$$p_{g,k} = v_{3,g,k} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} T_k(x) q_{3,E,k}(x) dx. \quad (6.12)$$

Bei der empirischen Ermittlung einer Trenngradkurve aus Messdaten kann die Gleichung 6.8 nicht direkt angewendet werden, sondern muss, weil die Verteilungsdichten der Teilchengrößen üblicherweise als Histogramm vorliegen, umformuliert werden

$$\bar{T}_k(\bar{x}_g) = \frac{v_{3,g,k} \bar{q}_{3,g,k}(\bar{x}_g)}{\bar{q}_{3,E,k}(\bar{x}_g)}. \quad (6.13)$$

Dabei gilt

$$v_{3,g,k} = v_{3,g} \frac{a_{g,k}}{a_{E,k}} \quad (6.14)$$

mit

$a_{g,k}$: Massenanteil der Stoffgruppe k im Grobgut,

$a_{E,k}$: Massenanteil der Stoffgruppe k im einfließenden Stoffstrom.

Sollen Ausrüstungs- und Betriebsgrößen eines Siebes, wie z. B. die Siebmaschenweite oder die offene Siebfläche, bzw. zusätzliche Stoffeigenschaften als Einflussfaktoren bei der Prozessmodellierung berücksichtigt werden, kann das oben beschriebene Modell um Teilmodelle für die Trenngradkurve ergänzt werden. Teilmodelle für Ausrüstungs- und Betriebsgrößen können in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht erstellt werden, weil, wie bereits beschrieben, keine Möglichkeit zur gezielten Variation dieser Größen besteht. Stattdessen werden aber Trenngradkurven unterschiedlich ausgeführter Siebklassierprozesse empirisch ermittelt.

Darüber hinaus wird die Biegesteifigkeit der Altpapierobjekte als möglicher Einflussfaktor betrachtet. Denn Altpapierobjekte passieren die Sieblöcher nicht nur, wenn ihre Abmessungen kleiner als die der Sieböffnungen sind, sondern auch, wenn sie stark verformt werden. Dies ist in Bild 6.4 schematisch und als Modell gezeigt. Gemäß der Modellvorstellung hängt das Ausmaß der Verformung von der Biegesteifigkeit des Objekts und den wirkenden Kräften, z. B. der Streckenlast verursacht durch das Eigengewicht oder Kräfte durch den Kontakt mit dem Siebboden bzw. anderen Objekten, ab.

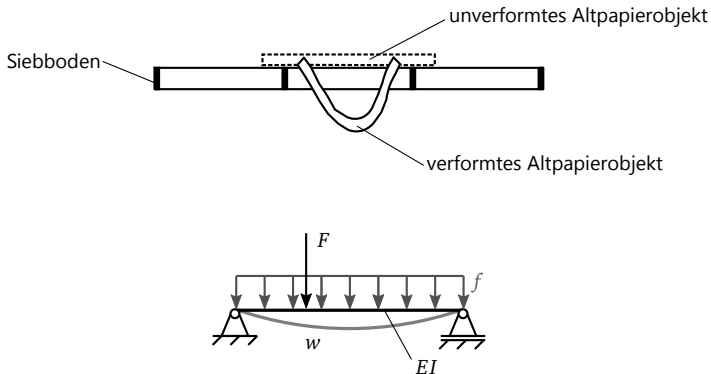


Bild 6.4: Verformung eines Altpapierobjekts auf dem Siebboden; oben: Querschnitt eines Siebbodens mit Altpapierobjekt; unten: Modell; w : Verschiebung EI : Biegesteifigkeit, f : Streckenlast durch Eigengewicht, F : äußere Kraft

Die Messung der Biegesteifigkeit von einer hohen Anzahl an Altpapierobjekten würde sich sehr aufwendig gestalten. Anders als bei der Teilchengröße wäre auch der Aufwand, um die Messung zu automatisieren, hoch. Um zunächst eine Abschätzung darüber treffen zu können, wie stark die Biegesteifigkeit zwischen unterschiedlichen Altpapierobjekten streut, wird ein Tastversuch durchgeführt.

Für den Versuch werden aus einer Probe des Eingangsmaterials einer Altpapiersortieranlage Objekte zufällig ausgewählt, die eine rechteckige Schablone mit den Abmaßen 17 cm · 25 cm vollständig überdecken. Die Schablonengröße orientiert sich an der Größe der Sieblöcher der Altpapiersortierung. Die ausgewählten Objekte werden auf der Schablone in der Mitte mit Gewichten aufsteigender Masse belastet und die Masse aufgezeichnet, bei der sie hindurch fallen. Die größte noch ertragbare Masse wird als ein grobes Maß zum Vergleich der Biegesteifigkeit herangezogen. Es werden zylinderförmige Gewichte mit einem Durchmesser von 65 mm in den Abstufungen 0,2; 0,4; 0,7; 1,0; 1,4; 2,0; 3,0 und 5,0 kg eingesetzt.

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Bild 6.5 nach Stoffgruppen zusammengefasst gezeigt. Daraus geht hervor, dass sich die Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Stoffgruppe in einem bestimmten Bereich bewegt. Beispielsweise liegt die Biegesteifigkeit der Stoffgruppen B, Wb, Ww, Kgr,b,ge und Kw,g,h in einem hohen Bereich, wohingegen sie bei den Stoffgruppen Wd, Pw, Pgr und Pge in einem verhältnismäßig niedrigen Bereich zu finden ist.

Daraus folgt, dass durch die Ermittlung von stoffgruppenspezifischen Trenngradkurven, wie in der Modellgleichung 6.12 vorgesehen, auch der Einflussfaktor Biegesteifigkeit in vereinfachter Form in das Modell Eingang findet. Ergänzende Teilmodelle zur detaillierten Beschreibung des Einflusses der Biegesteifigkeit werden in Anbetracht dieser Tatsache und des dafür notwendigen Aufwands nicht erstellt.

Im Zusammenhang mit der Biegesteifigkeit der Altpapierobjekte muss noch ein weiterer Aspekt erwähnt werden: Die Biegesteifigkeit von Papier hängt unter anderem auch von seinem Feuchtegehalt ab [CBGH01, Bos06]. Bei regnerischem Wetter kann Altpapier aus haushaltsnaher Sammlung, das Eingangsmaterial der Sortieranlagen, einen erheblich höheren Feuchtegehalt aufweisen als bei trockenem Wetter. Dies kann z. B. dadurch bedingt sein, dass Wasser in die Sammelbehälter eindringt, weil sie von den Nutzern nicht vollständig geschlossen werden. Der Einfluss von Schwankungen des Feuchtegehalts im Altpapier kann in dieser Arbeit aber nicht modelliert werden, da die Eigenschaft bei der in dieser Arbeit durchgeführten Datenerfassung nicht gezielt beeinflusst werden kann. Anhand von Stichproben wird bei der Datenerfassung der Siebprozesse allerdings der gegebene Feuchtegehalt des Altpapiers gemessen (siehe Anhang C.1).

6.3.1 Grobsiebung

Bei der empirischen Ermittlung von Trenngradkurven der Grobsiebprozesse treten in dieser Arbeit folgende Schwierigkeiten auf. Zum ersten ist bei allen untersuchten Grobsiebprozessen das Feingut aufgrund der Anlagengestaltung nicht für eine Beprobung zugänglich, sodass eine Bilanzausgleichsrechnung der Messda-

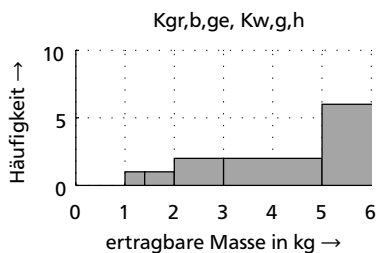
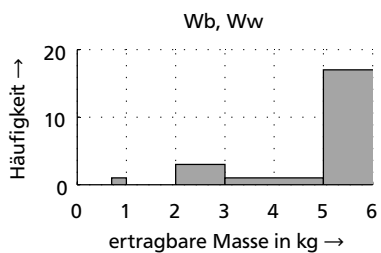
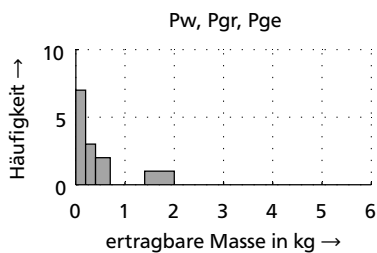
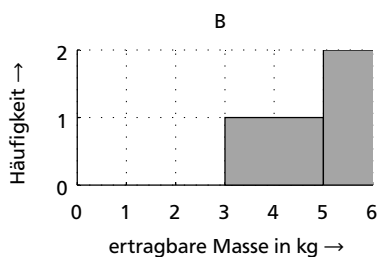
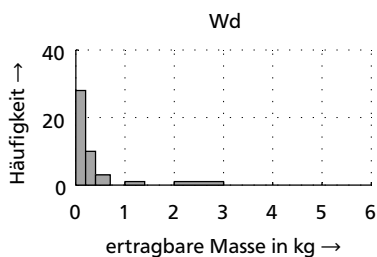
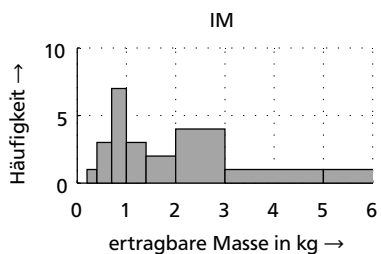
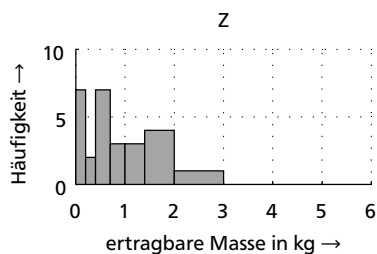


Bild 6.5: Histogramme der ertragbaren Massen der Stoffgruppen; Stoffgruppen mit ähnlichen mechanischen Eigenschaften sind zusammen abgebildet

Tabelle 6.1: Zusammenfassung von Stoffgruppen für die Modellierung der Grobsiebung

zusammengefasste Stoffgruppe	Teilstoffgruppen
Wellpappe, Karton, Bücher	Wb, Ww, Kgr,b,ge, Kw,g,h, B
übrige	Z, IM, Wd, Pw, Pgr, Pge, Vs, H, PPKu, pf, S

ten nicht möglich ist. Zum zweiten kann der einfließende Stoffstrom nur aus einem Haufwerk beprobt und dabei der Massenstrom nicht bestimmt werden (siehe Abschnitt 5.2). Der Grobgutmassenanteil muss daher aus Daten des Anlagenbetreibers über durchschnittliche Massenströme in der Anlage geschätzt werden. Die dritte Schwierigkeit für die Modellierung ist es, dass relativ große Objekte in den beprobten Stoffströmen nur in geringer Anzahl vorkommen, sie aber durch ihre üblicherweise verhältnismäßig hohe Masse einen großen Einfluss auf die Messergebnisse ausüben.

Um die Modellierung zu vereinfachen, werden deshalb Stoffgruppen zusammengefasst. Dabei werden zuerst die Ergebnisse des Versuchs zur Biegesteifigkeit von Altpapierobjekten (siehe Bild 6.5) hinzugezogen. Diese zeigen, dass die Stoffgruppen B, Wb, Ww, Kgr,b,ge und Kw,g,h eine im Mittel mit Abstand höhere Biegesteifigkeit als die übrigen Stoffgruppen besitzen. Zusätzlich zeigen die Messdaten zur Grobsiebung, dass diese Stoffgruppen bei allen untersuchten Prozessen den Hauptanteil des Grobguts bilden (siehe Anhang C.1). Daher werden diese Stoffgruppen für die Modellierung der Grobsiebung zusammengefasst und allen übrigen Stoffgruppen gegenübergestellt (siehe Tabelle 6.1).

Pro Prozess, der modelliert werden soll, sind demnach zwei Trenngradkurven empirisch aus den gemessenen Verteilungsdichten der Teilchengrößen und dem Grobgutmassenanteil zu ermitteln. Für den ersten untersuchten Prozess der Grobsiebung, Nr. 1, sind die in Kapitel 5 erfassten Messdaten in Bild 6.6¹ exemplarisch dargestellt. Anhand der Daten wird festgestellt, dass eine Berechnung der Trenngradkurven nach Gleichung 6.13 für diesen Prozess unbrauchbare Ergebnisse liefern würde. Auch bei den anderen in dieser Arbeit untersuchten Grobsiebprozessen führt die Betrachtung der Daten (siehe Anhang C.1) zu der gleichen Schlussfolgerung. Es ist daher notwendig, weitergehende Vereinfachungen vorzunehmen.

Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit die Vereinfachung gewählt, die Trenngradkurve durch drei Geradenabschnitte zu beschreiben (siehe Bild 6.7), an-

¹ Alle in dieser Arbeit dargestellten Fehlerbalken geben die empirische Standardabweichung des Mittelwerts $s_{\bar{y}}$ nach Gleichung 4.3 an.

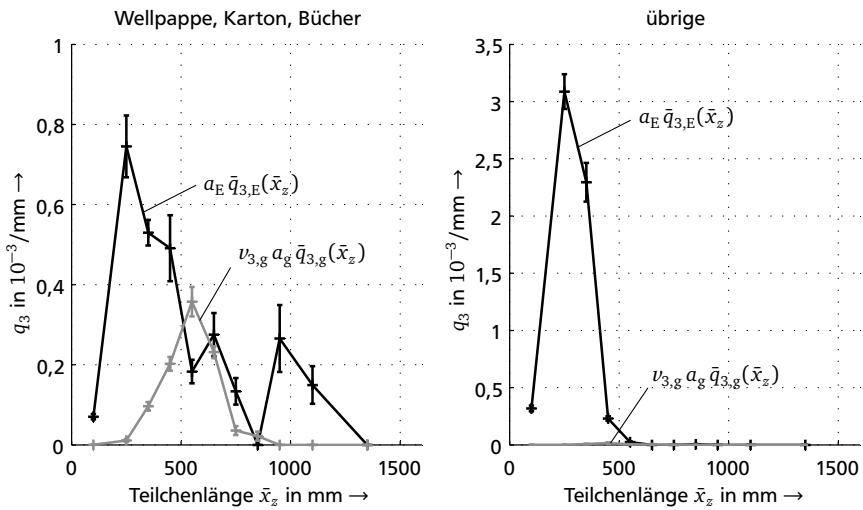


Bild 6.6: Messdaten zur Grobsiebung Nr. 1

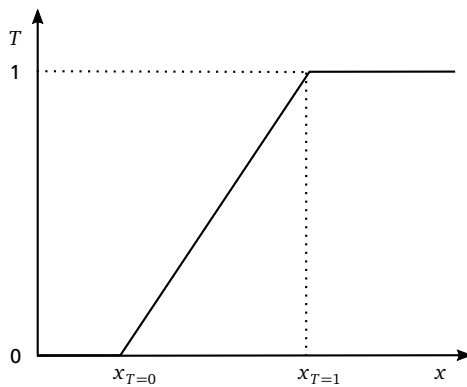


Bild 6.7: Modellansatz für die Trenngradkurven $T(x)$ der Grobsiebung

statt die in der Literatur übliche s-förmige Beschreibung der Trenngradkurve [Bun12, Rog82, KS12] einzusetzen. Für den gewählten Modellansatz sind pro Trenngradkurve zwei Punkte anzugeben: die Teilchenlängen $x_{T=0}$ und $x_{T=1}$. Diese werden folgendermaßen ermittelt.

Für $x_{T=0}$ wird die Teilchenlänge eingesetzt, unterhalb der die Verteilungsdichte im Grobgut annähernd verschwindet. Für $x_{T=1}$ sollte entsprechend die Teilchenlänge eingesetzt werden, oberhalb der die Verteilungsdichte im Feingut annähernd verschwindet. Da für das Feingut der betrachteten Prozesse, wie bereits beschrieben, keine Datenerfassung möglich ist, kann $x_{T=1}$ aber nur über einen Umweg bestimmt werden. Bei allen untersuchten Grobsiebprozessen wird das Feingut in der nächsten Stufe der Sortieranlage einer Feinsiebung unterzogen (siehe Bild 6.8). Das Grobgut des Feinsiebs FS_g ist, im Gegensatz zum Feingut des Grobsiebs GS_f , für eine Beprobung zugänglich, sodass an dieser Stelle Messdaten erhoben werden (siehe Anhang C.1). Für $x_{T=1}$ wird anschließend die Teilchenlänge bestimmt, oberhalb der die Verteilungsdichte im Grobgut des Feinsiebs FS_g annähernd verschwindet. Diese Methode ist in Bild 6.9 am Beispiel der Grobsiebung Nr. 1 für die Stoffgruppe Wellpappe, Karton, Bücher dargestellt.

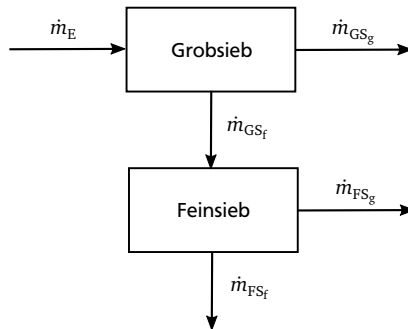


Bild 6.8: Anlagenschema der Siebprozesse in den untersuchten Altpapiersortieranlagen

Bei allen untersuchten Grobsiebprozessen ergeben sich zusammen mit den Messdaten (siehe Anhang C.1) und mit dieser Bestimmungsmethode für die Stoffgruppe Wellpappe, Karton, Bücher die in Tabelle 6.2 aufgeführten Werte. Dass bis zu einer Teilchenlänge von 300 mm bei allen Prozessen nahezu keine Teilchen im Grobgut enthalten sind, ist zu erwarten, weil die Siebmaschenweite der Prozesse sich in diesem Größenbereich bewegt (siehe Tabelle 5.1).

Von der Stoffgruppe übrige ist im Aufgabegut bei allen untersuchten Prozessen nur ein sehr geringer Anteil großer Teilchen enthalten und gleichzeitig ist der

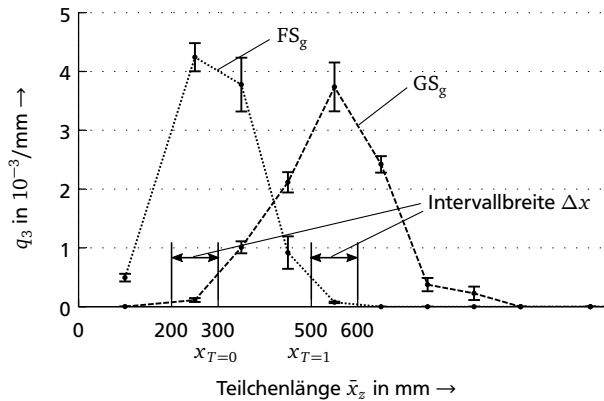


Bild 6.9: Bestimmung der Teilchenlängen $x_{T=0}$ und $x_{T=1}$ des Modells der Trenngradkurve am Beispiel der Grobsiebung Nr. 1 für die Stoffgruppe Wellpappe, Karton, Bücher

Tabelle 6.2: Modellparameter der Prozesse der Grobsiebung für die Stoffgruppe Wellpappe, Karton, Bücher

Grobsiebung Nr.	$x_{T=0}$ in mm	$x_{T=1}$ in mm
1	300	500
2	300	600
3	300	600
4	300	600

Grobgutmassenanteil sehr niedrig (siehe bspw. Bild 6.6). In allen Modellen wird der Trenngrad daher vereinfachend konstant null gesetzt

$$T_{\text{übrige}}(x) = 0. \quad (6.15)$$

Die Ergebnisse der empirischen Modellierung der Grobsiebung lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die erstellten linearen Trenngradkurven der Stoffgruppe Wellpappe, Karton, Bücher sind bei drei untersuchten Prozessen identisch und unterscheiden sich vom vierten Prozess nur geringfügig. Bei der Stoffgruppe übrige wird bei allen Prozessen ein Trenngrad von 0 eingesetzt. Im Überblick weisen die vier Prozesse trotz Unterschieden bei den Siebtypen und den Ausrüstungsgrößen also eine ähnliche Charakteristik auf. Durch die notwendigen Vereinfachungen sind Feinheiten der Prozesscharakteristika allerdings nicht erkennbar.

6.3.2 Feinsiebung

Bei allen Feinsiebprozessen sind sowohl im Grob- als auch im Feingut fast alle Stoffgruppen vertreten (siehe Anhang C.2). Es wird daher anders als bei der Grobsiebung nicht nur zwischen den sehr biegesteifen Stoffgruppen und den übrigen Stoffgruppen unterschieden, sondern eine Unterteilung in drei Steifigkeitsbereiche vorgenommen: hohe, mittelhohe und niedrige Biegesteifigkeit. Dadurch ergibt sich die Einteilung der Stoffgruppen in Tabelle 6.3.

Zur Bestimmung der empirischen Trenngradkurven werden für die zwei untersuchten Prozesse zuerst die Daten der einfließenden Stoffströme mittels der Messdaten der ausfließenden Stoffströme berechnet, da die einfließenden Stoffströme nicht für eine Beprobung zugänglich sind. Dazu wird die Software STAN (siehe Abschnitt 6.1) eingesetzt. Anschließend werden die Trenngradkurven nach Gleichung 6.13 berechnet. Die Ergebnisse sind zusammen mit den Messdaten der ausfließenden Stoffströme in Bild 6.10 und 6.11 angegeben. Werden die mit A gekennzeichneten Punkte als Ausreißer bewertet, liegen zwischen den Trenngradkurven der Stoffgruppen Wellpappe, Karton, Bücher und IM, Z sowie übrige keine signifikanten Unterschiede vor. Es ist folglich auch kein Einfluss der mittleren Biegesteifigkeit der Stoffgruppen auf das Trennverhalten zu beobachten.

Dieses Ergebnis entspricht nicht den Erwartungen, könnte aber ggf. dadurch erklärt werden, dass die Unsicherheiten der Trenngradkurven einen möglichen Einfluss der Biegesteifigkeit überdecken. Eine umfangreichere Ursachenbetrachtung kann an dieser Stelle nicht durchgeführt werden, da hierfür detailliertere und damit für diese Arbeit zu aufwendige Messungen vorgenommen werden müssten.

Tabelle 6.3: Einteilung der Stoffgruppen für die Modellierung der Feinsiebung

zusammengefasste Stoffgruppe	Teilstoffgruppen	Grund
Wellpappe, Karton, Bücher	Wb, Ww, Kgr,b,ge, Kw,g,h, B	hohe Biegesteifigkeit
Z, IM	Z, IM	mittelhohe Biegesteifigkeit
übrige	Wd, Pw, Pgr, Pge, Vs, H, PPKu, pf	niedrige Biegesteifigkeit
S	-	abweichende Definition der Teilchengröße

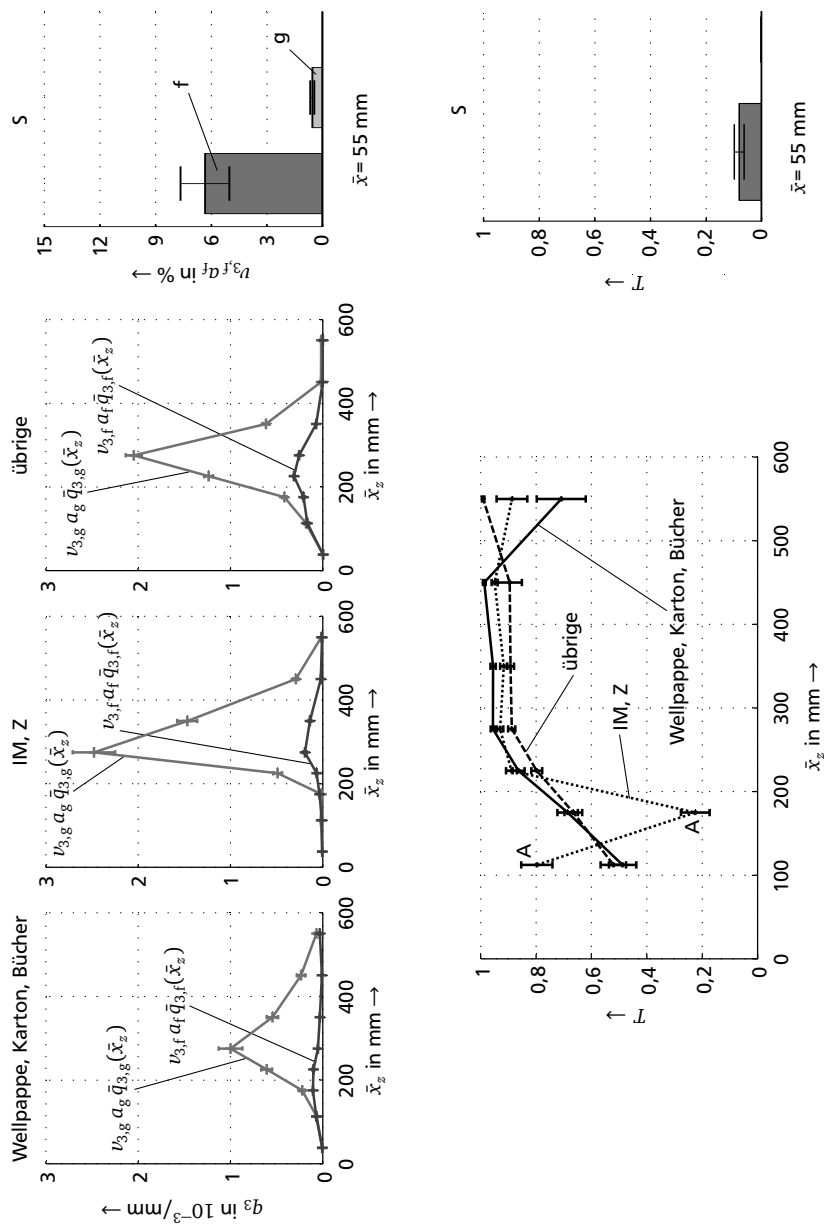


Bild 6.10: Messdaten der ausfließenden Stoffströme und empirische Trenngradkurven der Feinsiebung Nr. 1

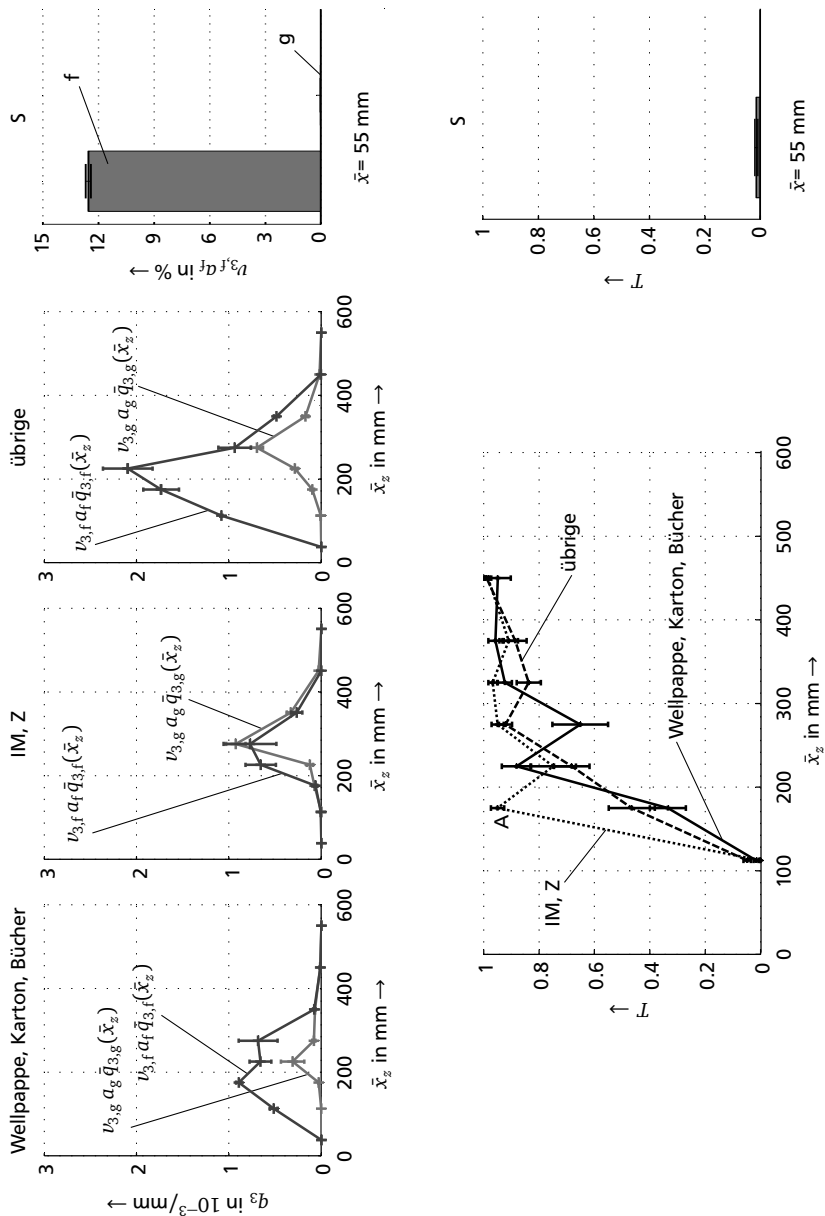


Bild 6.11: Messdaten der ausfließenden Stoffströme und empirische Trenngradkurven der Feinsiebung Nr. 2

Für die Beschreibung der empirischen Trenngradkurven durch einen mathematischen Ausdruck wird als Approximationsfunktion die RRSB-Verteilungsfunktion gewählt [DIN 66145, Bun12]

$$T(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{x'}\right)^n\right] \quad (6.16)$$

mit

x' : Lageparameter,

n : Steilheitsparameter.

Diese Funktion ist, verglichen mit den anderen in der Literatur vorgestellten Approximationsfunktionen (siehe Abschnitt 2.2.2), einfach aufgebaut und bildet die empirischen Trenngradkurven der Feinsiebprozesse trotzdem gut ab. Zur Ermittlung der Parameter x' und n werden alle Stoffgruppen außer der Stoffgruppe S gemeinsam betrachtet und die Methode der kleinsten Quadrate angewendet.

Die Ergebnisse der Parameteranpassung sind in Tabelle 6.4 und in Bild 6.12 angegeben. Die Bestimmtheitsmaße R^2 liegen mit über 0,96 nahe 1 und zeigen damit, dass die gewählte RRSB-Verteilungsfunktion ein gutes Modell für die Trenngradkurven darstellt. Der Unterschied zwischen den Lageparametern x' der beiden Prozesse beträgt ca. 50 mm. Dies wird auf die Unterschiede zwischen den Maschenweiten der beiden Siebe (70 mm · 120 mm bei Nr. 1 und 180 mm · 100 mm bei Nr. 2) zurückgeführt. Ob ein Feinsiebprozess mit einem relativ hohen oder einem relativ niedrigen Lageparameter für die Altpapiersortierung als besser zu bewerten ist, lässt sich nicht verallgemeinern. Denn die Aufgabe der Feinsiebung ist es, kleine, unerwünschte Objekte, die von den Hauptsortierprozessen der Altpapiersortierung nur schlecht erfasst werden können, abzutrennen (siehe Abschnitt 2.1.2). Gleichzeitig sind möglichst wenige erwünschte Objekte zu entfernen. Die Beurteilung des Lageparameters eines Feinsiebprozesses ist deshalb eine Ermessensfrage, bei der die Prozesstechnik der Hauptsortierung beachtet werden muss.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Parameteranpassung der RRSB-Verteilungsfunktion für die Trennfunktionen der Feinsiebung Nr. 1 und 2

Feinsiebung Nr.	Lageparameter x' in mm	Steilheitsparameter n	Bestimmtheitsmaß der Approximation R^2
1	151	1,27	0,969
2	199	3,53	0,967

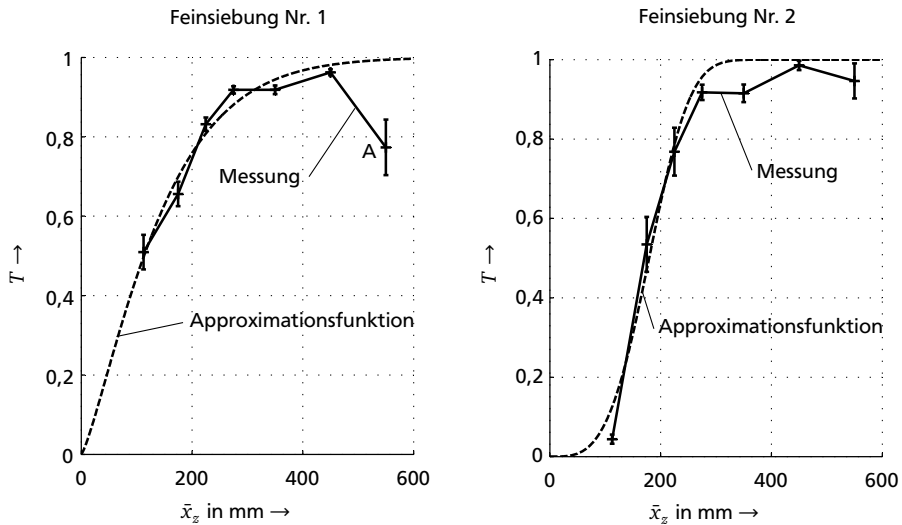


Bild 6.12: Approximationsfunktionen der Trenngradkurven der Feinsiebung Nr. 1 und Nr. 2 bei Zusammenfassung aller Stoffgruppen außer S; A: Ausreißer, bei der Anpassung unberücksichtigt

Die Güte der Klassierung der beiden Feinsiebungsprozesse lässt sich anhand der Steilheit der Trenngradkurven beurteilen. Bei einer idealen Klassierung hätte die Trenngradkurve die Form einer Sprungfunktion von Null auf Eins [Sti09]. Je höher der Steilheitsparameter n , desto höher ist demnach die Güte der Klassierung. Bei Prozess Nr. 2 beträgt der Steilheitsparameter mehr als das Dreifache als von Prozess Nr. 1, obwohl bei beiden Prozessen der selbe Maschinentyp zum Einsatz kommt. Die Ursachen hierfür können vielfältig sein und bspw. Betriebs- oder Ausrüstungsgrößen der Siebmaschinen umfassen. Bei Prozess Nr. 1 fällt in diesem Zusammenhang auf, dass die tatsächliche Länge der rechteckigen Siebmaschinen stark um die nominelle Länge von 120 mm schwankt. Einige Siebmaschinen sind bis zu 1,5-fach so lang wie die nominelle Länge. Dieser Aspekt könnte eine Erklärung für den niedrigeren Steilheitsparameter des Prozesses sein.

6.4 Paperspikeprozesse

Bei den Paperspikeprozessen gibt es einen einfließenden Stoffstrom und zwei ausfließende Stoffströme: das Akzept (Index a) und das Rejekt (Index r). Das dazugehörige Modell ist in Bild 6.13 dargestellt und die Anwendung der grundlegenden Modellgleichungen 6.3 und 6.4 liefert

$$\dot{m}_{a,k} = (1 - p_{r,k}) \dot{m}_{E,k}, \quad (6.17)$$

$$\dot{m}_{r,k} = p_{r,k} \dot{m}_{E,k}. \quad (6.18)$$

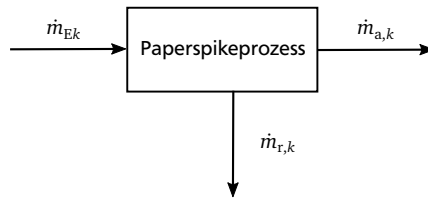


Bild 6.13: Modell der Paperspikeprozesse

Ausrüstungs- und Betriebsgrößen von Paperspikeprozessen können aus oben genannten Gründen in dieser Arbeit nicht variiert werden und finden daher keinen Eingang in das Modell. Stoffeigenschaften, die die Prozesse beeinflussen, sind die Biegesteifigkeit, die Durchstoßfestigkeit und ggf. die Teilchengröße (siehe Abschnitt 2.1.3). In dieser Arbeit wird die Eigenschaft Teilchengröße vernachlässigt, weil der Nagelabstand der untersuchten Paperspikemaschine über dem Walzenumfang 100 mm und zwischen den Nagelreihen 160 mm beträgt, sodass bei allen Altpapierobjekten außer dem Sortierrest die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist, von mindestens einem Nagel getroffen zu werden. Bei den Stoffeigenschaften Biegesteifigkeit und Durchstoßfestigkeit ist aus der Literatur nicht bekannt, wie diese sich in Kombination genau auf die Paperspikeprozesse auswirken. Sie werden daher ebenfalls nicht in das Modell aufgenommen. Für die Modellierung werden aber solche Stoffgruppen zusammengefasst, deren mechanische Eigenschaften gleich sind (siehe Tabelle 6.5).

Tabelle 6.5: Zusammenfassung von Stoffgruppen für die Modellierung der Paperspikemaschine

zusammengefasste Stoffgruppe	Teilstoffgruppen
Büropapier	Pw, Pgr, Pge
Wellpappe	Wb, Ww
Karton	Kgr,b,ge, Kw,g,h

Die Parameteranpassung zur untersuchten Paperspikemaschine liefert die in Bild 6.14 dargestellten Ergebnisse. Stoffgruppen, deren Massenanteil im einfließenden Stoffstrom weniger als 0,5 % beträgt, sind nicht abgebildet, weil die Unsicherheit der Modellparameter sehr hoch ist. Wie zu erwarten, ist der Austrag in den Rejektstrom bei den Wellpappen, die sehr biegesteif und gleichzeitig mit wenig Kraft zu durchstoßen sind, am höchsten. Allerdings liegt der Modellparameter mit 39,7 % weit von den angestrebten 100 % entfernt.

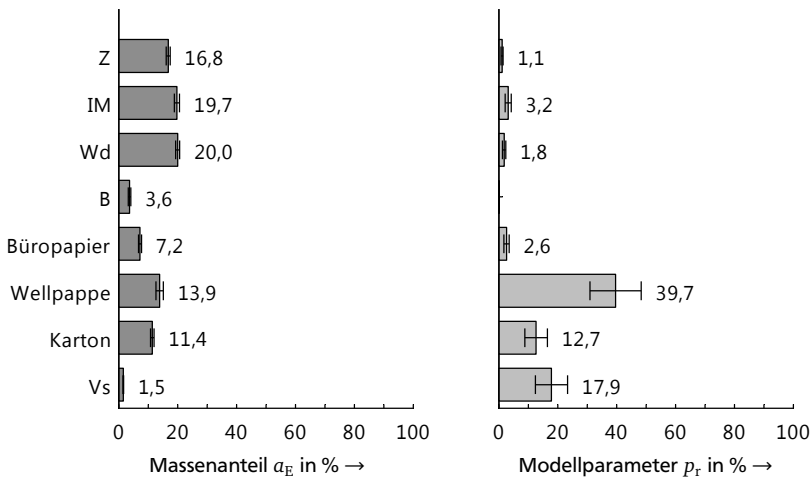


Bild 6.14: Daten und Ergebnisse der Parameteranpassung des Paperspikemaschinenprozesses

Die grafischen Papiere (Z, IM, Wd, B, Büropapier) gelangen in sehr geringen Anteilen (1,1 bis 3,2 %) in den Rejektstrom. Diese Fehlausträge könnten durch eine unvollständige Vereinzelung der Altpapierobjekte im einfließenden Stoffstrom verursacht werden. Es ist aber auch möglich, dass die Biegesteifigkeit und die Durchstoßfestigkeit einzelner Objekte in einem Bereich liegen, in dem sie von den Nägeln der Paperspikemaschine erfasst werden können.

6.5 Automatische Klaubung

Die automatische Klaubung erzeugt wie die Paperspikoprozesse einen Akzept- und einen Rejektstoffstrom. Folglich können die Gleichungen 6.17 und 6.18 übernommen werden. Eine tiefergehende Beschreibung des Prozesses könnte nach dem Modell von Rosenkranz [RK05] durch eine differenzierte Betrachtung der Teilprozesse Erkennen, Trennen und Austragen erfolgen (siehe Abschnitt 2.2.2). Allerdings setzt dies voraus, dass die drei Teilprozesse an einer Maschine zur automatischen Klaubung getrennt voneinander untersucht werden können und hierzu müsste wiederum eine Zugriffsmöglichkeit auf die Datenverarbeitung der Maschine bestehen. Da diese Möglichkeit im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gegeben ist, wird das Modell von Rosenkranz nicht umgesetzt. Stattdessen werden zwei Teilaspekte betrachtet.

Den Haupteinflussfaktor auf die automatische Klaubung stellt vermutlich das eingesetzte Sensorsystem mit der Erkennungssoftware dar. Es besteht eine Vielzahl an Sensorsystemen, die jeweils unterschiedliche Stoffeigenschaften erfassen (siehe Abschnitt 2.1.4). Dieser Faktor wird bei der Modellierung qualitativ durch die Einteilung der Stoffgruppen berücksichtigt, die in Tabelle 6.6 aufgeführt ist.

Die Stoffeigenschaft Teilchengröße wird in der Literatur als weiterer Einflussfaktor der automatischen Klaubung genannt. Die in dieser Arbeit untersuchten Maschinen zur automatischen Klaubung können laut Herstellerangaben mindestens Teilchen ab einer Größe von 35 mm erkennen und austragen. Bei der Datenerfassung in dieser Arbeit zeigt sich, dass der Massenanteil des Sortierrests in den Stoffströmen der untersuchten Maschinen maximal 0,4 % beträgt (siehe Anhang C.4). Die Stoffströme enthalten somit keine relevanten Mengen an Teilchen kleiner als 35 mm, sodass die Teilchengröße in den Modellen für die automatische Klaubung nicht berücksichtigt wird.

Nach der Einteilung der Stoffgruppen wird für die untersuchten industriellen Prozesse der automatischen Klaubung eine Parameteranpassung mit den in Kapitel 5 erfassten Daten durchgeführt. Die Stoffgruppe S wird dabei aufgrund ihrer sehr geringen Massenanteile ausgelassen.

Die Ergebnisse der Parameteranpassung sind in Bild 6.15 für den Rejektstoffstrom dargestellt. Bei beiden Prozessen wird die Stoffgruppe Wb besser ausgetragen als die meisten anderen Stoffgruppen, was den Erwartungen entspricht. Auch bei der Stoffgruppe Kgr,b,ge erfüllt sich die Erwartung, dass diese nur zu relativ geringen Anteilen aus dem einfließenden Stoffstrom entfernt werden kann. Bei den Stoffgruppen Z, Pgr, IM, Wd, B und Pw, die möglichst vollständig im Akzept-

Tabelle 6.6: Einteilung der Stoffgruppen für die Modellierung der automatischen Klaubung

(zusammengefasste) Stoffgruppe	Teilstoff- gruppen	Grund
Z, Pgr	Z, Pgr	ähnliche optische und stoffliche Eigenschaften; sollen vollständig im Akzeptstrom verbleiben
IM, Wd, B	IM, Wd, B	ähnliche optische und stoffliche Eigenschaften; sollen vollständig im Akzeptstrom verbleiben
Pw	-	soll vollständig im Akzeptstrom verbleiben
Wb	-	für Deinking ungeeignet; vermutlich sehr einfach zu erkennen
Ww	-	für Deinking ungeeignet; vermutlich weniger ein- fach zu erkennen als Wb
Kgr,b,ge	-	für Deinking ungeeignet; Oberfläche weist häu- fig ähnliche optische und stoffliche Eigenschaften wie Im, Wd und B auf
Kw,g,h	-	nur bedingt für Deinking geeignet; Oberfläche weist häufig ähnliche optische und stoffliche Ei- genschaften wie Kgr,b,ge auf
PPKunerw	Pge, Vs, H, PPKv, PPKu	übrige für Deinking unerwünscht
pf	-	andere stoffliche Eigenschaften als Papier
S	-	gemischte optische und stoffliche Eigenschaften

strom verbleiben sollten, sind Fehlausträge zu verzeichnen. Bei dem Prozess Nr. 2 sind die Fehlausträge mit Modellparametern von maximal 7,0 % nicht so gravierend, bei Prozess Nr. 1 mit 16,0 bzw. 12,3 % bei den Stoffgruppen Z, Pgr bzw. IM, Wd, B hingegen schon. Allerdings ist bei Prozess Nr. 1 zu berücksichtigen, dass die Unsicherheit der Modellparameter vergleichsweise hoch ist. Ursachen für die Fehlausträge können eine fehlerhafte Erkennung, eine unvollständige Vereinzelung der Altpapierobjekte auf dem Zuführförderband oder Fehler beim Austragen sein. Bei den bisher nicht genannten Stoffgruppen weisen die beiden Prozesse keine einheitlichen Tendenzen auf. Diese Unterschiede könnten durch die Sensorsysteme, die Vereinzelungsgüte auf dem Zuführförderband oder die Unsicherheit der Messdaten bedingt sein.

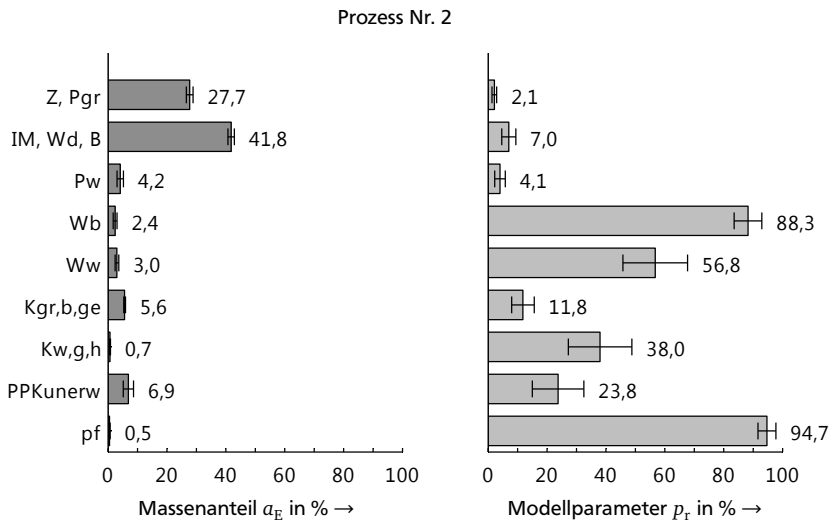
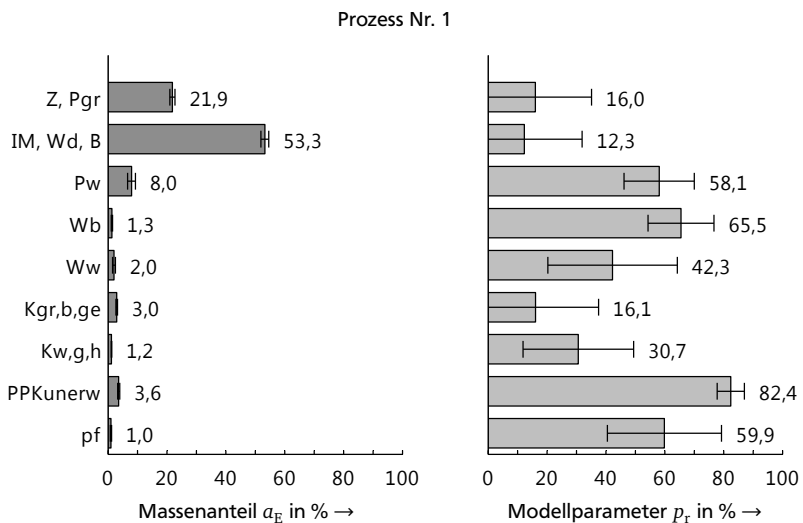


Bild 6.15: Daten und Ergebnisse der Parameteranpassung der automatischen Klaubung

6.6 Handklaubung

Bei der Handklaubung (siehe Bild 6.16) wird eine Trennung in drei austretende Stoffströme vorgenommen: Akzept (Index a), Papiere, für Deinking unerwünscht (Index un), und Papierfremdes (Index f). Die Modellgleichungen lauten

$$\dot{m}_{a,k} = (1 - p_{un,k} - p_{f,k}) \dot{m}_{E,k}, \quad (6.19)$$

$$\dot{m}_{un,k} = p_{un,k} \dot{m}_{E,k}, \quad (6.20)$$

$$\dot{m}_{f,k} = p_{f,k} \dot{m}_{E,k}. \quad (6.21)$$

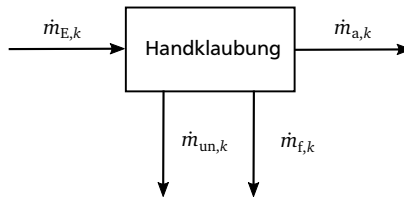


Bild 6.16: Modell der Handklaubung

Das Sortierergebnis der Handklaubung wird von den unterschiedlichsten Faktoren beeinflusst. Neben den in der Literatur aufgeführten Aspekten Stückgröße, Vereinzelungsgüte, Klaubegeschwindigkeit, Schwierigkeit der Entscheidung sowie Motivation und Ausbildung des Sortierpersonals (siehe Abschnitt 2.1.5) spielen vermutlich auch die Faktoren räumliche Gestaltung des Klaubeplatzes, Anordnung des Sortierpersonals an einem Band und weitere eine Rolle.

Aufgrund der großen Anzahl an Einflussfaktoren und der Schwierigkeit, einige dieser Faktoren zu quantifizieren, wird bei der Modellierung nur der wichtigste Einflussfaktor beachtet. In einer bestehenden Anlage, in der die räumlichen und personellen Gegebenheiten sowie die Vereinzelungsgüte als annähernd konstant betrachtet werden können, ist der wichtigste Einflussfaktor der Handklaubung vermutlich die Erkennbarkeit der abzutrennenden Altpapierobjekte. Diese geht qualitativ durch die Einteilung der Stoffgruppen (siehe Tabelle 6.7) in das Modell ein.

Tabelle 6.7: Einteilung der Stoffgruppen für die Modellierung der Handklaubung

(zusammengefasste) Stoffgruppe	Teilstoffgruppen	Grund
Pgrafisch	Z, IM, Wd, B, Pw, Pgr	sollen vollständig im Akzeptstrom verbleiben
Wb	-	für Deinking ungeeignet; sehr einfach zu erkennen
Ww	-	für Deinking ungeeignet; weniger einfach zu erkennen als Wb
Kgr,b,ge	-	für Deinking ungeeignet; häufig großflächig bedruckt und daher weniger einfach zu erkennen
Kw,g,h	-	nur bedingt für Deinking geeignet; schwer von Kgr,b,ge zu unterscheiden
PPKunerw	Pge, Vs, H, PPKv, PPKu	übrige für Deinking unerwünscht
pf	-	im Altpapier unerwünscht
S	-	gemischte Eigenschaften

Für die beiden industriellen Handklaubeprozesse, für die im Rahmen dieser Arbeit Daten erfasst wurden, wird eine Parameteranpassung durchgeführt. Die Stoffgruppe S wird, wie bei der automatischen Klaubung, aufgrund ihrer sehr geringen Massenanteile nicht betrachtet.

Die Ergebnisse der Anpassung sind in Bild 6.17 in komprimierter Form dargestellt. In den Stoffstrom f gelangen, wie gefordert, bei beiden Prozessen nur Altpapierobjekte der Stoffgruppe pf. Die Modellparameter der restlichen Stoffgruppen betragen demnach null und sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in Bild 6.17 nicht angegeben. Da bei Prozess Nr. 1 der Massenanteil der Stoffgruppe pf im einfließenden Strom nur 0,1 % beträgt, wird in diesem Fall der Modellparameter p_f insgesamt nicht abgebildet.

Bild 6.17 zeigt hingegen, dass bei beiden Prozessen nahezu keine Fehlausträge der grafischen Papiere in den Stoffstrom un stattfinden, sodass diese Objekte, wie gefordert, fast vollständig im Akzeptstrom verbleiben. Hierin liegt, verglichen mit der automatischen Klaubung, ein großer Vorteil. Die Annahme, dass Wellpappen besser abgetrennt werden können als andere Stoffgruppen, wird tendenziell bestätigt. Es fällt weiterhin auf, dass die Gesamtausbringung bei Prozess Nr. 2 deutlich höher ist als bei Prozess Nr. 1. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei Prozess Nr. 2 das Verhältnis von Sortierpersonal zu Eingangsmassenstrom mit 4 Personen bei 5,0 t/h höher als bei Prozess Nr. 1 mit 6 Personen bei 18,4 t/h ausfällt (siehe Kapitel 5.1 und Anhang C.5).

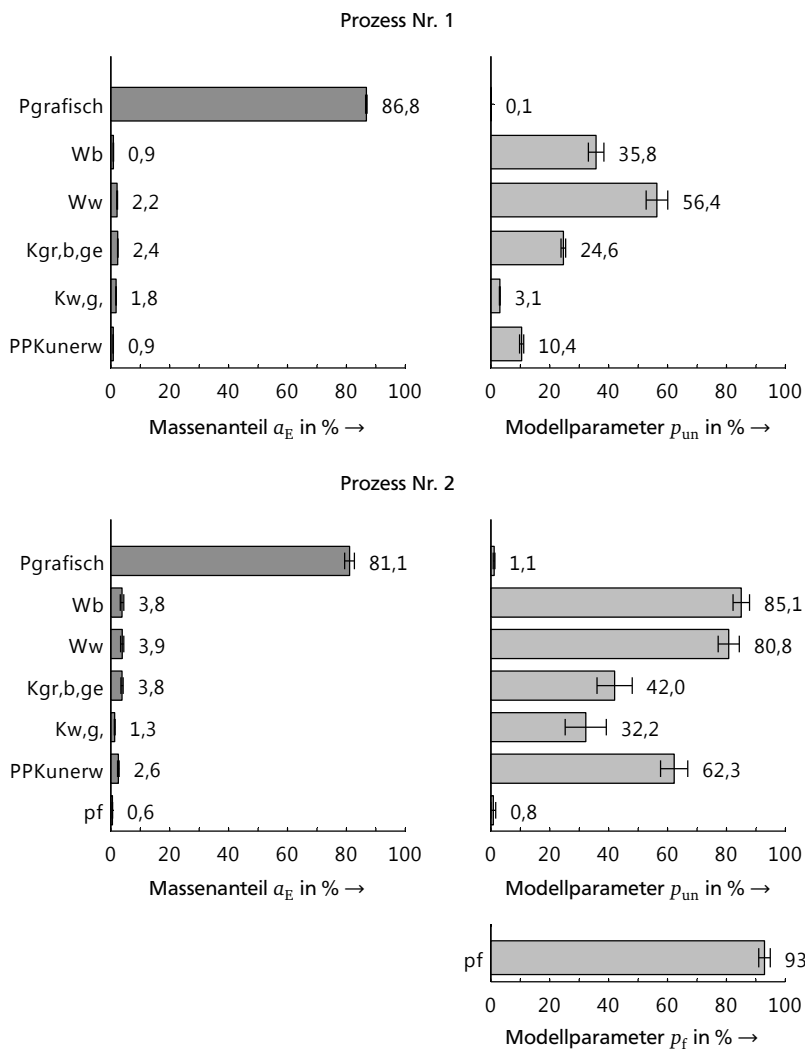


Bild 6.17: Daten und komprimierte Ergebnisse der Parameteranpassung der Handklaubung

6.7 Fazit

In diesem Kapitel wurden für die Grundprozesse der Altpapiersortierung Modelle erstellt, die empirische Modellparameter enthalten. Aufgrund von Einschränkungen bei der Datenerfassung sind diese Modelle nur für den Normalbetrieb der untersuchten Maschinen gültig. Weiterhin muss beachtet werden, dass die empirisch bestimmten Modellparameter aufgrund von Unsicherheiten der Datenerfassung ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sind. Dadurch ist die Aussagekraft der Ergebnisse in manchen Fällen eingeschränkt.

Für die Prozesse der Grobsiebung lässt sich festhalten, dass die erstellten linearen Trenngradkurven der vier untersuchten Prozesse sehr ähnliche Charakteristiken besitzen und bei allen Stoffgruppen außer Wellpappe, Karton und Bücher ein Trenngrad von konstant 0 in den Modellen angenommen wird.

Für die Modellierung der Trenngradkurven von zwei Feinsiebprozessen wurden fast alle Stoffgruppen zusammengefasst. Durch die RRSB-Verteilungsfunktion lassen sich die Trenngradkurven gut approximieren.

Die Prozesse der Hauptsortierung zur Erzeugung des Hauptprodukts Deinkingware (Paperspikeprozesse, automatische Klaubung und Handklaubung) haben gemeinsam, dass die Stoffgruppen W_b und W_w , die in der Deinkingware unerwünscht sind, in vielen Fällen am besten in die Rejektstoffströme ausgebracht werden können. Die Stoffgruppe p_f wird von der automatischen Klaubung und der Handklaubung zu hohen Anteilen entfernt, aber andere unerwünschte Stoffgruppen, wie z. B. $K_{gr,b,ge}$, werden weniger gut ausgetragen. Um diese Stoffgruppen bei der Erzeugung von Deinkingware besser entfernen zu können, muss folglich die Maschinentechnik weiterentwickelt oder die Handklaubung daran angepasst werden.

Grafische Papiere, die Stoffgruppen Z , IM , W_d , B , P_w und P_{gr} , sollen in den Prozessen der Hauptsortierung möglichst vollständig im Akzeptstrom verbleiben. Dies gelingt bei den untersuchten Handklaubeprozessen mit einem Modellparameter p_{un} von maximal 1,1 % sehr gut und bei dem Paperspikeprozess mit einem p_r von maximal 3,2 % gut. Die automatische Klaubung verursacht hingegen deutlich höhere Verluste der grafischen Papiere. Eine Verbesserung der Prozesstechnik wäre hier angebracht.



7 Modellvalidierung und Fließschemasimulation einer Altpapiersortieranlage

In diesem Kapitel werden die in den Kapiteln 3 und 6 entwickelten Werkzeuge für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen in Beispielsimulationen eingesetzt. Zuerst wird dafür ein Gesamtanlagenmodell einer existierenden industriellen Sortieranlage aufgebaut. Dieses Modell wird anschließend validiert und seine Anwendung in zwei Simulationen demonstriert.

7.1 Gesamtanlagenmodell

In Bild 7.1 ist das Schema der industriellen Sortieranlage dargestellt, die durch das Gesamtanlagenmodell abgebildet werden soll. Die Anlage hat zum Ziel, folgende Produkte zu erzeugen:

- Nebenprodukt 1: Altpapiersorte 1.04.00 aus dem Stoffstrom \dot{m}_{GSg} ,
- Nebenprodukt 2: Altpapiersorte 1.02.00 aus den Stoffströmen \dot{m}_{FSf} und \dot{m}_{AKf} ,
- Hauptprodukt: Altpapiersorte 1.11.00 nach einer Nachsortierung des Stoffstroms \dot{m}_{AKa} .

Dabei kann das Produkt der Altpapiersorte 1.11.00 mit dem höchsten Preis vermarktet werden [euw16].

Das Gesamtanlagenmodell wird aus Modellen der Grundprozesse, die in Kapitel 6 entwickelt wurden, zusammengesetzt. Als Modellparameter werden die Parameter der untersuchten Prozesse Grobsiebung Nr. 1, Feinsiebung Nr. 1 und automatische Klaubung Nr. 1 eingesetzt, da diese Parameter mittels Daten aus der zu modellierenden Sortieranlage bestimmt wurden.

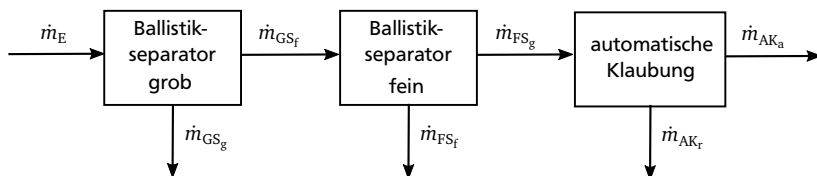


Bild 7.1: Schema der zu modellierenden industriellen Altpapiersortieranlage

7.2 Modellvalidierung

Die Modellvalidierung wird durch den Vergleich von Simulationsergebnissen mit Messdaten vorgenommen. Dazu werden in der industriellen Altpapiersortieranlage erneut Daten erfasst. Es wird dabei nach der in Kapitel 4 entwickelten Methode vorgegangen und alle in der Anlage zugänglichen Stoffströme über fünf Stunden verteilt beprobt. Diese erneute Datenerfassung erfolgt zu einem anderen Datum als die Datenerfassung für die Modellierung der Grundprozesse in Kapitel 5.

Die Analyse der genommenen Proben wird wie in Abschnitt 5.3 erläutert durchgeführt. Allerdings wird bei der Analyse eine Abweichung zu den übrigen Analysen in dieser Arbeit vorgenommen: Die Stoffgruppe gemischte Objekte wird bei der Berechnung der Massenanteile nicht berücksichtigt, weil für diese Stoffgruppe bei der Modellierung keine Modellparameter ermittelt wurden (siehe Abschnitt 6.1). Gegenüber den Analysedaten mit dieser Stoffgruppe erhöhen sich dadurch die Massenanteile der restlichen Stoffgruppen leicht. Da sich die gemischten Objekte aber aus den restlichen Stoffgruppen zusammensetzen, ist anzunehmen, dass der Fehler, der durch dieses Vorgehen gemacht wird, klein ist.

Die Ergebnisse der Datenerfassung sind in Anhang C.6 aufgelistet und die gemessene Zusammensetzung des einfließenden Stoffstroms ist in Bild 7.2 gezeigt. Die Daten des einfließenden Stoffstroms werden in das Gesamtanlagenmodell eingegeben und daraufhin die restlichen Stoffströme im Modell berechnet. Zur Beurteilung der Abbildungsgenauigkeit des Modells werden die Simulationsergebnisse mit den gemessenen Daten verglichen. Hierbei wird die Zusammensetzung der Stoffströme allerdings nicht nach allen Stoffgruppen einzeln aufgeschlüsselt, sondern in einer Form angegeben, wie sie für die zu erzeugenden Altpapiersorten der Anlage von Bedeutung sind (siehe Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: Zusammenfassung von Stoffgruppen nach Altpapiersorten

Altpapier- sorte	zusammengefasste Stoffgruppe	Ab- kürzung	Teilstoffgruppen
1.04.00	Wellpappe	W	Wb, Ww
	restliche Verpackungen	V	Kgr,b,ge, Kw,g,h, Vs
	Papiere, in 1.04.00 unerwünscht	un04	Z, IM, Wd, B, Pw, Pgr, Pge, H, PPKv, PPKu, S
	-	pf	pf
1.02.00	Zeitungen, Illustrierte, Magazine	Z, IM	Z, IM
	Papiere, in 1.02.00 unerwünscht	un02	PPKu
	restliche Papiere	Pr	Wd, B, Pw, Pgr, Pge, Wb, Ww, Kgr,b,ge, Kw,g,h, Vs, H, PPKv
	-	S	S
	-	pf	pf
1.11.00	-	Z	Z
	-	IM	IM
	restliche grafische Papiere (erwünscht)	Pgrr	Wd, B, Pw, Pgr
	für Deinking ungeeignet	Dun	Pge, Wb, Ww, Kgr,b,ge, PPKu
	restliche Papiere, in 1.11.00 unerwünscht	run11	Kw,g,h, Vs, H, PPKv
	-	pf	pf

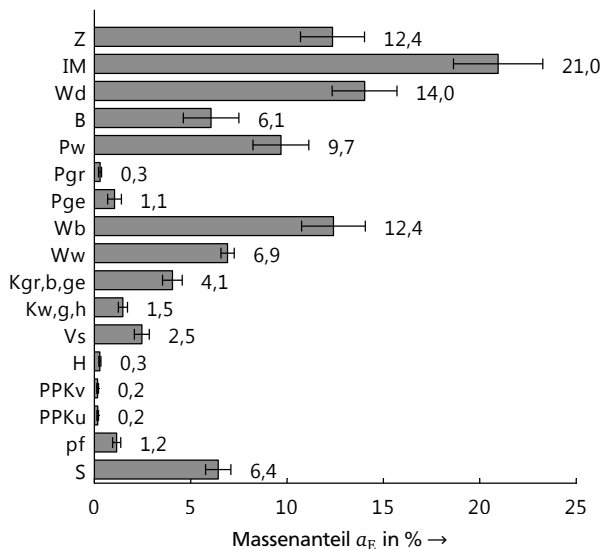


Bild 7.2: Gemessene Zusammensetzung des einfließenden Stoffstroms für die Validierung des Gesamtanlagenmodells

In Bild 7.3 sind die Simulationsergebnisse den gemessenen Daten gegenüber gestellt. Anders als bei den übrigen in der Arbeit gezeigten Messdaten geben die Fehlerbalken in diesen Diagrammen nicht die empirische Standardabweichung der Mittelwerte, sondern den Konfidenzbereich bei einer statistischen Sicherheit von 95 % (siehe Gleichung 4.2) an. Da die Unsicherheiten der Modellparameter nicht für alle Modelle bekannt sind, lässt sich für die Simulationsergebnisse kein Konfidenzbereich angeben. Es kann festgestellt werden, dass sich die Konfidenzbereiche der Messungen und die Simulationsergebnisse in den meisten Fällen überdecken und die Tendenz der Messdaten gut abgebildet wird. Ursachen für die wenigen Abweichungen können, neben den Unsicherheiten der Modellparameter, Vereinfachungen in den Modellen der Grundprozesse, Unsicherheiten bei der Datenerfassung des einfließenden Stoffstroms und die Vernachlässigung der Stoffgruppe gemischte Objekte sein.

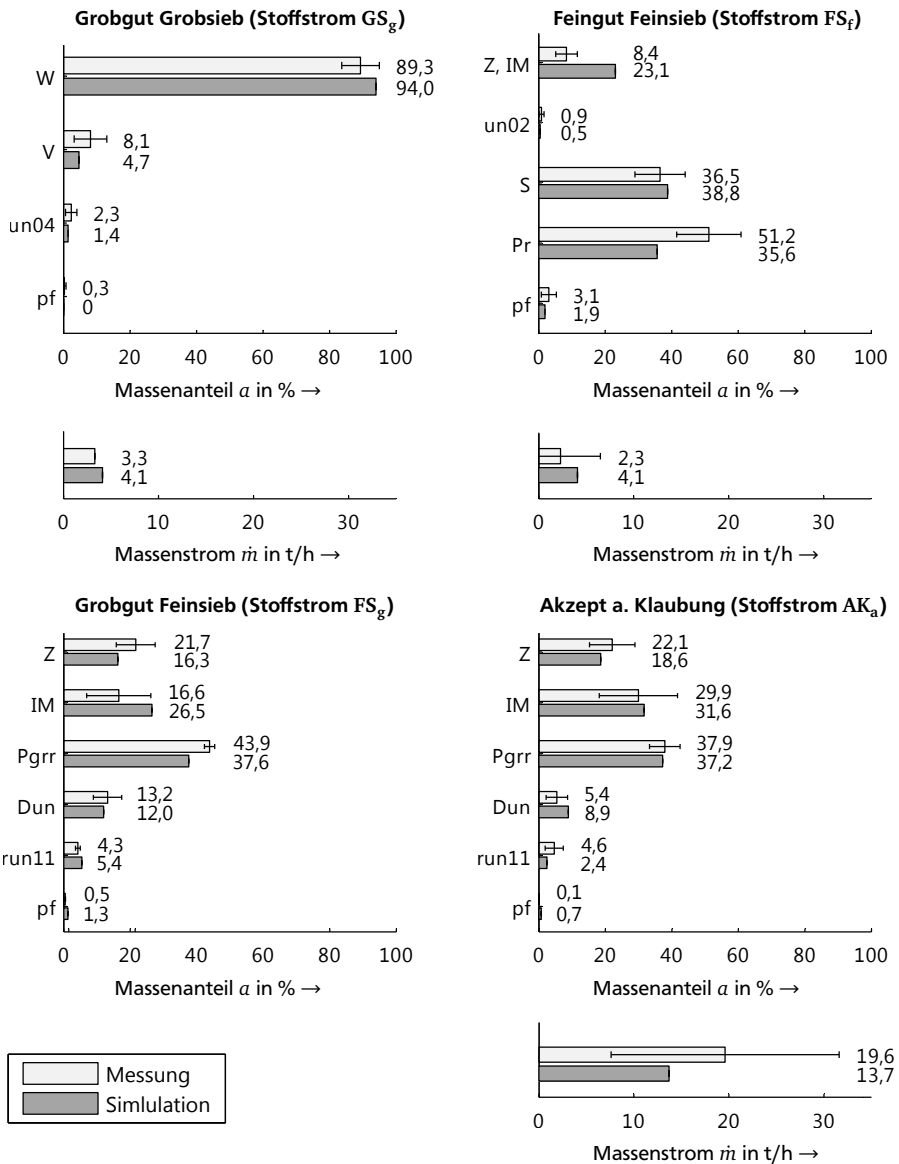


Bild 7.3: Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen Daten der modellierten Gesamtanlage; Fehlerbalken entsprechen dem Konfidenzbereich bei einer statistischen Sicherheit von 95 % nach Gleichung 4.2

7.3 Beispielsimulationen

Die Anwendung des Gesamtanlagenmodells wird nun durch die Simulation von zwei praxisrelevanten Szenarien beispielhaft demonstriert.

Im Szenario Nr. 1 werden alle Modellparameter und der einfließende Stoffstrom beibehalten, zusätzlich aber ein Paperspikeprozess hinzugenommen (siehe Bild 7.4). Es wird erwartet, dass dadurch die Qualität des Hauptproduktstroms verbessert wird. Für den Paperspikeprozess werden die Modellparameter aus Bild 6.14 eingesetzt.

Im Szenario Nr. 2 wird die Zusammensetzung des einfließenden Stoffstroms modifiziert. Es wird dabei davon ausgegangen, dass Altpapier aus haushaltsnaher Sammlung in Zukunft weniger Zeitungen und dafür höhere Anteile an Wellpappen enthalten wird. Denn in den letzten Jahren ist in Deutschland beispielsweise die Auflage von Tageszeitungen kontinuierlich zurückgegangen: von z. B. 19,4 Millionen Exemplaren im Jahr 2010 auf 16,1 Millionen im Jahr 2015 [zei14]. Gleichzeitig berichtet der Verband der Wellpappen-Industrie von einem jährlich steigenden Absatz an Wellpappe [vdw15]. Um einen Ausblick auf die nächsten fünf Jahre zu geben, wird im Szenario Nr. 2 die Tendenz der letzten fünf Jahre fortgesetzt. Deshalb wird der Anteil der Zeitungen im einfließenden Stoffstrom der Sortieranlage um 20 % von 12,4 auf 9,9 % reduziert und der Anteil der gesamten Wellpappen um den entsprechenden Betrag erhöht (für die Stoffgruppe Wb von 12,4 auf 13,7 % und Ww von 6,9 auf 8,1 %).

In den Simulationsrechnungen werden die gleichen Modellparameter wie im validierten Gesamtanlagenmodell eingesetzt. Es wird somit vernachlässigt, dass sich Veränderungen der Stoffstromeigenschaften möglicherweise auf die Charakteristiken der Trennprozesse auswirken. Diese Vereinfachung muss aber getroffen werden, weil die in Kapitel 6 entwickelten Modelle nur den Normalbetrieb einer Sortieranlage zum Zeitpunkt der Modellierung wiedergeben können.

Die Ergebnisse der Szenariensimulationen für den Hauptproduktstrom nach der automatischen Klaubung AK_a sind in Bild 7.5 zusammen mit dem Ursprungszustand dargestellt. Im Szenario Nr. 1 liegt der Anteil der unerwünschten Materialien (Dun, run11 und pf) im Stoffstrom um 2,4 %-Punkte niedriger als im Ursprungszustand, wodurch sich die Qualität wie vermutet verbessert. Allerdings geht mit der Qualitätsverbesserung auch eine Reduzierung des Massenstromes \dot{m}_{AK_a} um 0,6 t/h einher. Mittels dieser Daten lässt sich nun bspw. abschätzen, ob sich die Investition in eine Paperspikemaschine für die Anlage lohnen würde.

Im Szenario Nr. 2 verschlechtert sich zum einen durch die Erhöhung des Anteils der unerwünschten Materialien um 1 %-Punkt die Qualität des Hauptproduktstroms

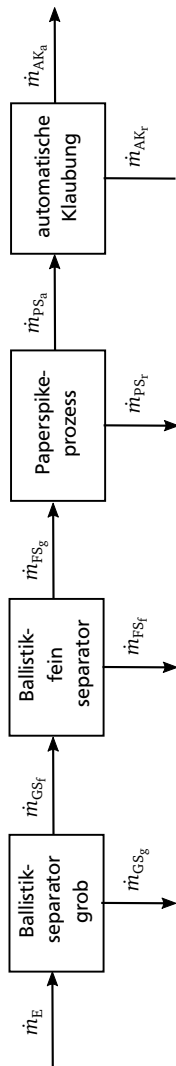


Bild 7.4: Schema des Gesamtanlagenmodells mit Paperspike (Szenario Nr. 1)

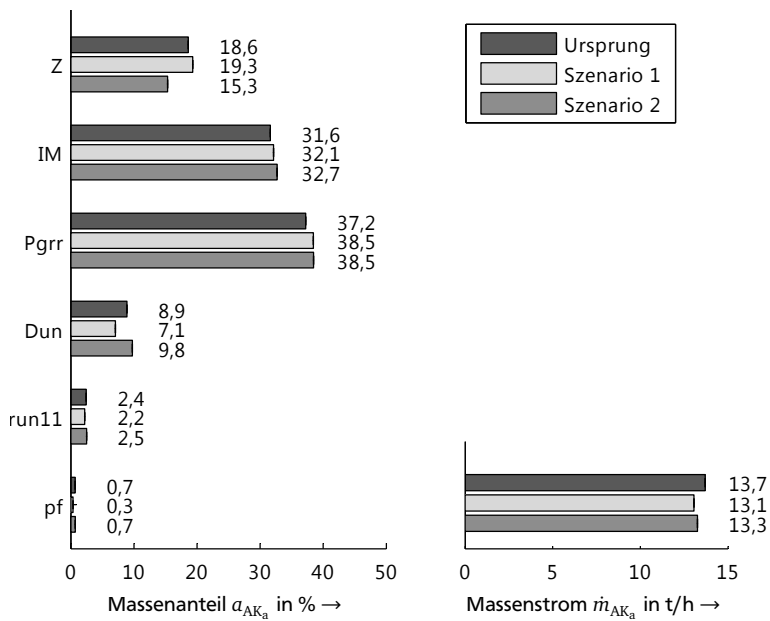


Bild 7.5: Ergebnisse der Anlagensimulationen mit den Szenarien Nr. 1 und 2 gegenüber dem Ursprungszustand für den Hauptproduktstrom AK_a

AK_a . Zum anderen wird auch der Massenstrom \dot{m}_{AK_a} um 0,4 t/h gesenkt. Um die Qualität des Ursprungszustands zu erhalten, muss folglich mit Maßnahmen reagiert werden. Durch ergänzende Simulationsrechnungen mit den in dieser Arbeit entwickelten Werkzeugen ließe sich die Wirkung potentieller Maßnahmen abschätzen.

7.4 Fazit

Anhand der Validierung eines Gesamtanlagenmodells wurde in diesem Kapitel gezeigt, dass Altpapiersortieranlagen mit den in dieser Arbeit entwickelten Werkzeugen in einer für die Fließschemasimulation geeigneten Form abgebildet werden können. In Beispielsimulationen wurde außerdem demonstriert, dass durch den Einsatz der Werkzeuge eine virtuelle Untersuchung von Altpapiersortieranlagen einfach und relativ schnell möglich ist. Dies eröffnet folglich die Möglichkeit, kosten- und/ oder zeitintensive experimentelle Untersuchungen in der industriellen Praxis durch Simulationen zu ersetzen, um Verbesserungspotential für die Altpapiersortierung zu ermitteln.

Wie in der Beispielsimulation Nr. 1 gezeigt, lassen sich anhand von Fließschemasimulationen Anlagenstrukturen miteinander vergleichen und bewerten, um die bestmögliche Anlagenstruktur unter gegebenen Randbedingungen zu finden. Außerdem lässt sich der Einfluss von saisonalen und langfristigen Veränderungen des einfließenden Stoffstroms einer Altpapiersortieranlage auf das Sortierergebnis abschätzen, wie in der Beispielsimulation Nr. 2 verdeutlicht. Hierdurch können z. B. Investitionsentscheidungen unterstützt werden. Zusätzlich lassen sich die in dieser Arbeit entwickelten Werkzeuge auch einsetzen, um Verbesserungsmöglichkeiten für einzelne Prozesse oder Maschinen der Altpapiersortierung aufzuzeigen.



8 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war es, Werkzeuge für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen zu entwickeln. Die Werkzeuge sollten eine Beschreibung für die Stoffströme und Modelle für die in der Altpapiersortierung in Deutschland relevanten Prozesse beinhalten. Zusätzliches Ziel war es, eine Methode für die Datenerfassung von Stoffströmen in Altpapiersortieranlagen zu erstellen. Im ersten Kapitel der Arbeit wurde deshalb zunächst der Stand der Technik der Altpapiersortierung in Deutschland zusammengefasst sowie der Stand des Wissens zu Werkzeugen für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen zusammengetragen.

Anschließend wurde die Beschreibung der Stoffströme entwickelt. In dieser Beschreibung wird der Stoff Altpapier als ein Gemisch von Stoffgruppen beschrieben und die Stoffgruppen durch Eigenschaften charakterisiert. 18 Stoffgruppen, die für die Altpapiersortierung relevant sind, wurden in einem Stoffgruppenkatalog definiert und die Verteilung der Teilchengröße wurde als charakterisierende Eigenschaft in die Beschreibung aufgenommen.

Da die Stoffstrombeschreibung modular aufgebaut ist, kann sie an unterschiedliche Fließschemasimulationsaufgaben angepasst werden. Je nach Bedarf lassen sich im Stoffgruppenkatalog übergeordnete Gruppen bilden oder Unterteilungen vornehmen. Auch die Eigenschaftsliste lässt sich ergänzen, sodass in einer Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen auch Eigenschaften betrachtet werden können, die bspw. für die Altpapieraufbereitung in der Suspension oder die Papierherstellung von Bedeutung sind.

Auf der Stoffstrombeschreibung basierend wurde danach die Methode für die Datenerfassung von Stoffströmen erarbeitet. Sie beinhaltet Verfahren zur Entnahme von Stichproben, zu deren Analyse und zur Bestimmung von Massenströmen in industriellen Altpapiersortieranlagen. Für die Analyse der Stichproben wurde eine automatische Messanlage entwickelt, mit der der zeitliche und personelle Aufwand der Probenanalyse gegenüber einer manuellen Analyse signifikant reduziert werden kann. Der Analyseaufwand unter Nutzung der Messanlage beträgt pro 10 kg Probenmenge etwa 1 Stunde. Die Anlage arbeitet mit einer Farbkamera und kann durch selbst entwickelte Mustererkennungsalgorithmen zwischen den Stoffgrup-

pen Zeitungen, Illustrierte und Magazine, Werbedruck, weiße Papiere, graue Papiere und braune Wellpappen automatisch unterscheiden.

Der Aufwand der Probenanalyse könnte durch eine Weiterentwicklung der automatischen Messanlage in Zukunft weiter reduziert werden. Vielversprechende Ansätze für die Weiterentwicklung sind eine Automatisierung der Teilfunktion Vereinzeln, eine Optimierung der Algorithmen zur Objektklassifikation und die Ergänzung von Sensoren, die es ermöglichen, mehr Stoffgruppen als bisher automatisch zu unterscheiden. Sensoren für den Glanz [US 8,411,276 B2], den Ligninanteil [RVG12] oder die Höhe bieten hierfür bei relativ geringen Anschaffungskosten ein Potential. Ein Forschungsprojekt zu diesen Themen wird am FACHGEBIET PAPIERFABRIKATION UND MECHANISCHE VERFAHRENSTECHNIK an der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DARMSTADT noch im Jahr 2016 beginnen.

Nach der Entwicklung der Methode zur Datenerfassung wurde diese zur Erhebung von Daten in industriellen Altpapiersortieranlagen eingesetzt. Es wurden fünf Anlagen, die Altpapier aus haushaltsnaher Sammlung zum Hauptzielprodukt Deinkingware verarbeiten, im Normalbetrieb untersucht.

Anschließend erfolgte die Modellierung der Grundprozesse der Altpapiersortierung. Zuerst wurde dazu ein grundlegendes Black-Box-Modell ohne zeitliche Abhängigkeiten erstellt und dieses danach für die einzelnen Prozesse konkretisiert. Bei der Konkretisierung der Modelle der Siebklassierung wurde die Teilchengröße in Form von Trenngradkurven berücksichtigt. Alle Modelle enthalten Parameter, die mittels der erfassten Messdaten bestimmt wurden.

Aufgrund von Unsicherheiten bei der Datenerfassung sind die Modellparameter ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet. In zukünftigen Untersuchungen, wie beispielsweise dem bereits genannten Forschungsprojekt, können durch eine Erhöhung der Probenmengen bei der Datenerfassung die Unsicherheiten reduziert und die Aussagekraft der Modellierungsergebnisse gesteigert werden.

Durch Berücksichtigung zusätzlicher Einflussfaktoren bei der Modellierung kann der Nutzen der Modelle für die Fließschemasimulation von Altpapiersortieranlagen in Zukunft noch erhöht werden. Für die Prozesse der Siebklassierung könnten die Modelle z. B. durch eine tiefergehende Betrachtung der Biegesteifigkeit der Altpapierobjekte präzisiert werden. Auch eine Beschreibung des Verhaltens der Grundprozesse in Abhängigkeit des Massenstroms der einfließenden Stoffströme wäre aufschlussreich.

Im letzten Kapitel dieser Arbeit wurde die Anwendung der entwickelten Fließschemasimulationswerkzeuge demonstriert. Es wurde dafür ein Gesamtanlagenmodell

aus Grundprozessmodellen zusammengesetzt und mittels Messdaten validiert. Dieses Modell wurde zum Schluss in Fließschemasimulationen mit praxisrelevanten Modellszenarien eingesetzt und dadurch gezeigt, dass die entwickelten Simulationswerkzeuge eine virtuelle Untersuchung von Altpapiersortieranlagen ermöglichen.

In der industriellen Praxis lassen sich die entwickelten Werkzeuge beispielsweise bei der Projektierung oder der Optimierung von Altpapiersortieranlagen einsetzen. Als Hilfsmittel stehen dazu Programmpakete für die Fließschemasimulation mechanischer Feststoffprozesse zur Verfügung. Die verbreitete Software ASPEN PLUS[®] des Anbieters ASPEN TECHNOLOGY, INC. beinhaltet z. B. Pakete, die den direkten Einsatz sowohl der Stoffstrombeschreibung als auch der Prozessmodelle aus dieser Arbeit erlauben [asp15].

Die entwickelten Werkzeuge können auch in Untersuchungen zur ganzheitlichen Modellierung des Altpapierkreislaufs Anwendung finden, um die Ressourceneffizienz des Altpapierrecyclings zu erhöhen. Hierzu können die Werkzeuge mit Programmpaketen zur Fließschemasimulation der Altpapieraufbereitung in der Suspension sowie der Papierherstellung kombiniert werden. Solche Programmpakete werden bspw. unter den Bezeichnungen FLOWMAC und PAPERMAC von OPDAL SIM-TECH AS [OPD16] oder unter der Bezeichnung BALAS[®] vom TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND [bal16] angeboten.



Literaturverzeichnis

- [asp15] ASPEN TECHNOLOGY, INC.: *Aspen Plus®V8 - Highlights, Resources, IT Support for V8*. Bedford, Massachusetts, 2015
- [bal16] BALAS®Overview. Version: 25.01.2016. <http://balas.vtt.fi/> Technical Research Centre of Finland
- [BC12] BOREL, P; COCHAUX, A.: Better sorting for better raw material and better recycling. In: *Revue de l'Association Technique de l'Industrie Papetiere* 66 (2012), Nr. 1, S. 20–27
- [Bey02] BEYER, C.: *Modellierung und Simulation von Abfallaufbereitungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Stoffstromvektorisierung*. Aachen: Shaker Verlag, 2002. – ISBN 3–8322–0570–5
- [BIC10] BOBU, E.; IOSIP, A.; CIOLACU, F.: Potential benefits of recovered paper sorting by advanced technology. In: *Cellulose Chemistry and Technology* 44 (2010), Nr. 10, S. 461–471
- [Bos06] BOS, J. H.: *Das Papierbuch - Handbuch der Papierherstellung*. 2. Auflage. Houten: ECA Pulp & Paper b. v., 2006. – ISBN 978–90–01–40258–7
- [Bou10] BOURELY, A.: Industrial sorting solutions for the paper industry. In: *Revue de l'Association Technique de l'Industrie Papetiere* 64 (2010), Nr. 3, S. 18–22
- [Bou13] BOURELY, A.: Paper Sorting with a Unique Combination of Thermal Imaging and Spectroscopy. In: *6th Advanced Training Course on "Deinking and Recycling"*. Grenoble: centre technique du papier, 2013
- [Bül06] BÜLL, U.: Sortieranalysen für die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung fester Abfälle. In: *Müll-Handbuch* (2006), Nr. 1671. Berlin: Erich Schmidt Verlag

-
- [Bun12] BUNGE, R.: *Mechanische Aufbereitung*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2012. – ISBN 3–527–33209–X
- [CBGH01] CORNWELL, M.; BERTHELOT, Y. H.; GRIGGS, D.; HABERGER, C. C.: Noncontact Determination of the Bending Stiffness of Paper Using Laser Ultrasonics and Wavelet Analysis: Effects of Moisture and Temperature. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*. Atlanta, 2001, S. 747–750
- [DIN 66145] DIN 66145: *Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen - RRSB Netz*. April 1976
- [DIN 9267-4] DIN 9267-4: *Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 4: Charakterisierung eines Trennprozesses*. Februar 2006
- [DIN EN 643] DIN EN 643: *Papier und Pappe - Europäische Liste der Standardsorten für Altpapier und Pappe*. Mai 2014
- [euw16] Altpapiermarkt Deutschland: Jahresausklang im Vergleich zum Vorjahr nahezu identisch. In: *EUWID Papier und Zellstoff* 90 (2016), Nr. 01
- [Fra05] FRANKE, T.: *Automatische Sortieranlagen für Altpapier in Deutschland - Technologie, Wirtschaftlichkeit, Qualität, Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik*, TU Darmstadt, Diplomarbeit, 2005
- [GWE09] GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L.: *Digital image processing using MATLAB*. 2nd Edition. Knoxville: Gatesmark Publishing, 2009. – ISBN 978–0–9820854–0–0
- [HS10] HÖKE, U.; SCHABEL, S.: *Papermaking Science and Technology - 7. Recycled Fibre and Deinking*. 2nd Edition. Helsinki: Fapet Oy, 2010. – ISBN 978–952–5216–40–0
- [HT14] HANKE, A.; TEMPEL, L.: Anlagenbau im Aufbereitungsbereich - am Beispiel der Altpapiersortierung. In: *Berliner Rohstoff- und Recyclingkonferenz*. Berlin, 2014, S. 439–453
- [IDHB12] IOSIP, A.; DOBON, A.; HORTAL, M.; BOBU, E.: The influence of contaminants in the environmental impact of recovered paper:

-
- a life cycle assessment perspective. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (2012), S. 1050–1058
- [INCB10] IOSIP, A.; NICU, R.; CIOLACU, F.; BOBU, E.: Influence of recovered paper quality on recycled pulp properties. In: *Cellulose Chemistry and Technology* 44 (2010), Nr. 10, S. 513–519
- [KK51] KENNEY, J. F.; KEEPING, E. S.: *Mathematics of Statistic - Part 2*. 2nd Edition. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1951
- [KS12] KING, R. P.; SCHNEIDER, C.: *Modeling and simulation of mineral processing systems*. 2nd Edition. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2012. – ISBN 978–0–87335–345–8
- [Lev99] LEVLIN, J.-E.: *Papermaking Science and Technology - 17. Pulp and Paper Testing*. Helsinki: Fapet Oy, 1999. – ISBN 952–5216–17–9
- [MBG⁺10] MIRANDA, R.; BOBU, E.; GROSSMANN, H.; STAWICKI, B.; BLANCO, A.: Factors influencing a higher use of recovered paper in the European paper industry. In: *Cellulose Chemistry and Technology* 44 (2010), Nr. 10, S. 419–430
- [opd16] *FlowMac and PaperMac*. Version: 25.01.2016. <http://www.opdalsimtech.com> Opdal SimTech AS
- [Pog07] POGODDA, M.: *Development of an advanced system for the modeling and simulation of solids processes*. Aachen: Shaker Verlag, 2007. – ISBN 978–3–8322–6235–8
- [Ras05] RASEMANN, W.: *Handbuch Probenahme und Qualitätssicherung bei der Untersuchung und Bewertung von Stoffsystemen; Band 1: Grundprobleme, Gesetzliche Anforderungen, Charakterisierung von Stoffsystemen physikalisch, chemisch, Ablauf der Probenahme*. Freiberg: Institut für Qualitätssicherung von Stoffsystemen Freiberg e. V., 2005. – ISBN 3–86012–249–5
- [Rau11] RAUCH, W.: Potential zur Optimierung. In: *Recycling Technology* (2011), Nr. 3, S. 32–34
- [red15] *Recycling von Altpapier*. Version: 18.09.2015. <http://www.redwave.at/sortierloesungen-recycling/papier> BT-Wolfgang Binder GmbH

-
- [ref16] *Modeling the Impact of Innovations on the Circular Economy*. Version: 13.01.2016. <http://reffibre.eu/about>
- [RHB⁺12] RAHMAN, M. O.; HUSSAIN, A.; BASRI, N. E. A.; SCAVINO, E.; BASRI, H.; HANNAN, M. A.: Chromaticity Based Waste Paper Grade Identification. In: *International Arab Journal of Information Technology* 9 (2012), Nr. 5, S. 411–417
- [RHS⁺09a] RAHMAN, M. O.; HANNAN, M. A.; SCAVINO, E.; HUSSAIN, A.; BASRI, H.: An Efficient Paper Grade Identification Method for Automatic Recyclable Waste Paper Sorting. In: *European Journal of Scientific Research* 25 (2009), Nr. 1, S. 96–103
- [RHS⁺09b] RAHMAN, M. O.; HUSSAIN, A.; SCAVINO, E.; HANNAN, M. A.; BASRI, H.: Segregating recyclable waste papers using co-occurrence features. In: *Recent Advances in Applied Computer Science - Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Applied Computer Science (ACS 09)*. Genua: WSEAS Press, 2009. – ISBN 978-960-474-127-4, S. 157–162
- [RHS⁺10] RAHMAN, M. O.; HUSSAIN, A.; SCAVINO, E.; BASRI, N. E. A.; BASRI, H.; HANNAN, M. A.: Waste Paper Grade Identification System using Window Features. In: *Journal of Computational Information Systems* 6 (2010), Nr. 7, S. 2077–2091
- [RHS⁺11] RAHMAN, M. O.; HUSSAIN, A.; SCAVINO, E.; BASRI, H.; HANNAN, M. A.: Intelligent computer vision system for segregating recyclable waste papers. In: *Expert Systems with Applications* 38 (2011), S. 10398–10407
- [RHS⁺12] RAHMAN, M. O.; HUSSAIN, A.; SCAVINO, E.; HANNAN, M. A.; BASRI, H.: Real-Time Waste Paper Grading using CBR approach. In: *International Journal of Innovative Computing Information and Control* 8 (2012), Nr. 1A, S. 471–488
- [RK05] ROSENKRANZ, J.; KUYUMCU, H. Z.: Mathematische Modellierung von Sortierprozessen - Ansätze, Strukturierung und Anwendung. In: *Sortieren - Innovationen und Anwendungen - Vorträge zum 4. Kolloquium Sortieren am 06. und 07. Oktober 2005 in Berlin*. Berlin: AAR, TU Berlin, 2005

-
- [Rog82] ROGERS, R. S. C.: A classification function for vibrating screens. In: *Powder Technology* 31 (1982), Nr. 1, S. 135–137
- [Ros00] ROSENKRANZ, J.: *Rechnergestützte Fließschemasimulation und Optimierung komplexer Feststoffprozesse*. Aachen: Shaker Verlag, 2000. – ISBN 3–8265–7167–3
- [Ros09] ROSENKRANZ, J.: Modellgestützte Simulation mechanischer Aufbereitungsverfahren zur Behandlung von Siedlungsabfällen. In: *Berliner Rohstoff- und Recyclingkonferenz 2009*. Berlin: TK Verlag, 2009
- [RVG12] RAMASUBRAMANIAN, M. K.; VENDITTI, R. A.; GILLELLA, P. K.: Sensor systems for high-speed intelligent sorting of waste paper in recycling. In: *Tappi Journal* 11 (2012), Nr. 2, S. 33–39
- [Sch84] SCHUBERT, H.: *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe - Band 3: Löse- und Laugeverfahrensstufen, Flüssigkeitsabtrennung, Agglomeration, Mischen und Vergleichmäßigen, Entstaubung, Lagern, Fördern, Probenahme*. 2. Auflage. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984
- [Sch95] SCHULER, H.: *Prozesssimulation*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1995. – ISBN 3–527–28635–7
- [Sch10] SCHUBERT, H.: *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010. – ISBN 3–527–30577–7
- [SH06] SACHS, L.; HEDDERICH, J.: *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – ISBN 978–3–540–32160–6
- [ste11] *Kombination von Nah-Infrarot- und Farb-Sensorik zur Papieridentifikation*. Version: 05.07.2011. <http://www.steinert.de/de/home/aktuelles/pressemeldungen RTT STEINERT>
- [Sti09] STIESS, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – ISBN 978–3–540–32552–9
- [TM15] TEMPEL, L.; MEINL, G.: *Entwicklung einer Methode zur Bestimmung des papiertechnologischen Gebrauchswertes von Altpapier*

als Entscheidungshilfe für die Beschaffung und den Einsatz des Sekundärrohstoffes - PTS-Forschungsbericht IK-MF-120064 . Papiertechnische Stiftung (PTS), München. 2015

- [Töb99] TÖBERMANN, J.: *Flowsheet Simulation of Solids Processing - The Development of a Simulation System and its Application to Soil Washing*. Aachen: Shaker Verlag, 1999
- [US 8,411,276 B2] Patent US008411276B2, 02.04.2013. DOAK, A. G.; ROE, M. G. ; KENNY, G. R.; MSS, Inc. (Anmelder): *Multi-grade object sorting system and method*.
- [vdp15] VERBAND DEUTSCHER PAPIERFABRIKEN E.V. (VDP): *Papier 2015 - Ein Leistungsbericht*. Bonn: 2015
- [vdw15] VERBAND DER WELLPAPPEN-INDUSTRIE E.V. (VDW): *Jahresbericht 2014 - Informationen aus der Wellpappen-Industrie*. Darmstadt: 2015
- [WP10] WEINERT, S.; PUTZ, H.-J.: *Qualitätseigenschaften der wichtigsten Altpapiersorten in Abhängigkeit von den Sortierbedingungen - Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 15408 N* . Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik, TU Darmstadt. 2010
- [zei14] BUNDESVERBANDS DEUTSCHER ZEITUNGSVERLEGER E.V. (BDZV): *Zeitungen 2015/2016*. Berlin: ZV Zeitungs-Verlag Service, 2014
- [Zwi05] ZWIESELE, B.: Probenahmemethoden für die Bestimmung von Menge und Zusammensetzung fester Abfälle. In: *Müll-Handbuch* (2005), Nr. 1661. Berlin: Erich Schmidt Verlag

A Automatische Messanlage für die Probenanalyse

A.1 Spezifikationen

Gerät	Typ	Eigenschaften
Lichtgitter	<i>MLG-2 Prime</i> von <i>SICK AG</i>	Abstand der Strahlen: 50 mm
Durchlaufwaage	<i>EC-M-SL-SI</i> von <i>OCS Checkweighers GmbH</i>	Genauigkeit: $\pm 0,5$ g im Bereich von 0,5 bis 5.000 g, Breite: 600 mm, Länge: 900 mm
Kamera	<i>Manta G-609</i> von <i>Allied Vision Technologies GmbH</i>	Auflösung: $2752 \cdot 2206$ Pixel
Beleuchtung	Leuchtdioden	Farbe 1: neutralweiß, Farbe 2: ultraviolett (UV) ≈ 420 nm

A.2 Merkmalsalgorithmen

A.2.1 Masse

Die flächenbezogene Masse ρ_A eines Altpapierobjekts ist die Masse pro Einheitsfläche

$$\rho_A = \frac{m}{A}$$

mit

m : Masse,

A : Gesamtfläche (siehe Bild A.1).

A.2.2 Form

Das Seitenverhältnis e ist das Verhältnis zwischen der Breite x_2 und der Länge x_1 (siehe Bild 4.5) eines Altpapierobjekts

$$e = \frac{x_2}{x_1}.$$

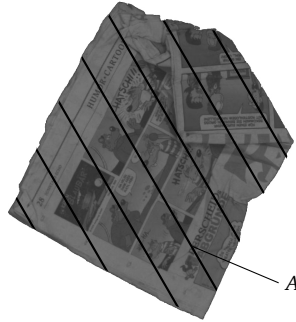


Bild A.1: Definition der Gesamtfläche A eines Altpapierobjekts

A.2.3 Farbe

Für die Bestimmung der Farbmerkmale eines Altpapierobjekts wird eine Transformation des Bildes, das bei weißem Licht aufgenommen wurde, vom RGB-Farbraum (rot, grün, blau) in den HSV-Farbraum (Hue, Saturation, Value) durchgeführt. Dabei wird die Standard-Transformation angewendet, wie sie z. B. in [GWE09] angegeben ist.

[BC12] zeigt, dass die Farbsättigung ein Merkmal ist, hinsichtlich dessen sich die Stoffgruppen Z und IM unterscheiden. Sie ist bei der Stoffgruppe Z durchschnittlich geringer als bei der Stoffgruppe IM. Es wird vermutet, dass sie auch zur Unterscheidung weiterer Stoffgruppen dienen kann.

Die Merkmale *mittlere Farbsättigung* \bar{S} und die *Standardabweichung der Farbsättigung* s_S werden folgendermaßen berechnet

$$\bar{S} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} S_i \quad (\text{A.1})$$

und

$$s_S = \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \sum_{i=1}^{N_p} (S_i - \bar{S})^2} \quad (\text{A.2})$$

mit

S_i : Farbsättigung des Pixels i ,

N_p : Anzahl der Vordergrundpixel.

Die Standardabweichung der Farbsättigung ist ein Maß für die Änderung der Farbsättigung über ein Altpapierobjekt. Diese Änderung kann klein- oder großskalig ausfallen. Dies hängt von dem Motiv, mit dem das Altpapierobjekt bedruckt ist, ab. Um relativ kleinskalige von relativ großskaligen

Änderung der Farbsättigung zu unterscheiden, wird das Merkmal *Standardabweichung der Standardabweichung der Farbsättigung* s_{s_s} definiert. Das Bild eines Altpapierobjekts wird zur Berechnung des Merkmals in quadratische Fenster mit einer Kantenlänge von 24 mm eingeteilt (siehe schematisch in Bild 4.7). Pro Fenster l wird die Standardabweichung der Farbsättigung s_{s_l} ermittelt und anschließend die Standardabweichung dieser Werte über alle Fenster $l = 1, \dots, N_L$ gebildet

$$s_{s_s} = \sqrt{\frac{1}{N_L - 1} \sum_{l=1}^{N_L} (s_{s_l} - \bar{s}_s)^2}, \quad (\text{A.3})$$

wobei

$$\bar{s}_s = \frac{1}{N_L} \sum_{l=1}^{N_L} s_{s_l} \quad (\text{A.4})$$

mit

N_L : Anzahl der Fenster, die Vordergrundpixel enthalten.

In Bild A.2 sind zwei Altpapierobjekte dargestellt. Der Wert der Standardabweichung der Farbsättigung s_s weicht bei dem linken Objekt, bei dem die Farbsättigung auf verhältnismäßig großen Flächen wenig Änderungen erfährt, deutlich von der Standardabweichung der Standardabweichung der Farbsättigung s_{s_s} ab. Bei dem rechten Objekt weisen beide Merkmale ähnliche Werte auf, was darauf zurückgeführt wird, dass die Farbsättigung relativ kleinskaligen Änderungen unterliegt.



$$\begin{aligned} s_s &= 8,8\% \\ s_{s_s} &= 2,9\% \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} s_s &= 4,1\% \\ s_{s_s} &= 4,5\% \end{aligned}$$

Bild A.2: Bilder von zwei Altpapierobjekten und deren Standardabweichungen der Farbsättigung s_s sowie die Standardabweichung der Standardabweichung der Farbsättigung s_{s_s}

Auch Veränderungen des Farbtons über ein Altpapierobjekt können als Erkennungsmerkmal von Nutzen sein. Bspw. sind Altpapierobjekte der Stoffgruppe Wd häufig sehr vielfarbig bedruckt. Als Maß für die Veränderung des Farbtons wird das Merkmal *mittlere Standardabweichung des Farbtons* \bar{s}_H gewählt. Um wie bei der Farbsättigung klein- von großskaligen Änderungen zu unterscheiden, wird zusätzlich das Merkmal *Standardabweichung der Standardabweichung des Farbtons* s_{s_H} definiert.

Zur Berechnung dieser Merkmale wird das Bild eines Altpapierobjekts ebenfalls in quadratische Fenster mit einer Kantenlänge von 24 mm eingeteilt und pro Fenster l die Standardabweichung des Farbtons s_{H_l} ermittelt

$$s_{H_l} = \sqrt{\frac{1}{N_{P_l} - 1} \sum_{i=1}^{N_{P_l}} (H_{i,l} - \bar{H}_l)^2}, \quad (\text{A.5})$$

wobei

$$\bar{H}_l = \frac{1}{N_{P_l}} \sum_{i=1}^{N_{P_l}} H_{i,l} \quad (\text{A.6})$$

mit

N_{P_l} : Anzahl der Vordergrundpixel im Fenster l ,

$H_{i,l}$: Farbton des Pixels i im Fenster l ,

\bar{H}_l : Mittelwert des Farbtons im Fenster l .

Über alle Fenster, die Vordergrundpixel enthalten, $l = 1, \dots, N_L$, ergibt sich

$$\bar{s}_H = \frac{1}{N_L} \sum_{l=1}^{N_L} s_{H_l} \quad (\text{A.7})$$

und

$$s_{s_H} = \sqrt{\frac{1}{N_L - 1} \sum_{l=1}^{N_L} (s_{H_l} - \bar{s}_H)^2}. \quad (\text{A.8})$$

A.2.4 Muster

Für die Extraktion der Mustermerkmale eines Altpapierobjekts wird eine Transformation des RGB-Bildes, das bei weißem Licht aufgenommen wurde, in ein Graustufenbild vorgenommen. Als Intensität des Graustufenbildes wird die Luminanz Y im NTSC-Farbraum (National Television Systems Committee) gewählt [GWE09]

$$Y = 0,2989R + 0,587G + 0,114B \quad (\text{A.9})$$

mit

R : Rotanteil,

G : Grünanteil,

B : Blauanteil.

Für die Rot-, Grün- und Blauanteile wird eine 8-Bit-Kodierung eingesetzt, sodass sich auch für die Luminanz eine 8-Bit-Kodierung ergibt.

Die Mustermerkmale mittlerer Kontrast, Glätte, 3. Moment, Uniformität und Entropie sind statistische Eigenschaften des normierten Histogramms der Luminanz $h_n(\bar{Y}_z)$ im Bereich $[0, Y_{\max}]$ [GWE09]

$$h_n(\bar{Y}_z) = \frac{N_z}{N_p} \quad (\text{A.10})$$

mit

\bar{Y}_z : mittlere Luminanz im Intervall z ,

N_z : Anzahl der Vordergrundpixel, deren Luminanz im Intervall z liegt,

N_p : Anzahl der Vordergrundpixel.

Das Merkmal *mittlerer Kontrast* \bar{K} ist [GWE09]

$$\bar{K} = \sqrt{M_2} \quad (\text{A.11})$$

mit

$$M_2 = \sum_{z=1}^L (\bar{Y}_z - \bar{Y})^2 h_n(\bar{Y}_z), \quad (\text{A.12})$$

$$\bar{Y} = \sum_{z=1}^L \bar{Y}_z h_n(\bar{Y}_z), \quad (\text{A.13})$$

wobei

M_2 : 2. Moment,

\bar{Y} : mittlere Luminanz,

L : Anzahl der Intervalle im Bereich $[0, Y_{\max}]$.

Die Glätte G , das 3. Moment M_3 , die Uniformität U und die Entropie E sind [GWE09]

$$G = 1 - \frac{1}{1 + \bar{K}^2}, \quad (\text{A.14})$$

$$M_3 = \sum_{i=1}^L (\bar{Y}_z - \bar{Y})^3 h_n(\bar{Y}_z), \quad (\text{A.15})$$

$$U = \sum_{i=1}^L h_n^2(\bar{Y}_z), \quad (\text{A.16})$$

$$E = - \sum_{i=1}^L h_n(\bar{Y}_z) \log_2 h_n(\bar{Y}_z). \quad (\text{A.17})$$

Die bisher betrachteten Mustermerkmale geben keine Auskunft über örtliche Zusammenhänge von Pixeln in einem Bild. Auf Basis einer sogenannten Co-Occurrence-Matrix können Mustermerkmale bestimmt werden, die Pixelpositionen berücksichtigen. Auf die Methode zur Berechnung einer Co-Occurrence-Matrix wird an dieser Stelle nicht genauer eingegangen. Sie kann der Literatur, bspw. [GWE09], entnommen werden.

Liegt eine normierte Co-Occurrence-Matrix eines Bildes vor und ist c_{ij} das ij -te Element dieser Matrix, lassen sich daraus die Merkmale *Kontrast (co-occurrence)* O_1 , *Korrelation* O_2 , *Energie* O_3 und *Homogenität* O_4 ermitteln [GWE09]

$$O_1 = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^D (i-j)^2 c_{ij}, \quad (\text{A.18})$$

$$O_2 = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^D \frac{(i-r_1)(j-r_2)c_{ij}}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (\text{A.19})$$

$$O_3 = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^D c_{ij}^2, \quad (\text{A.20})$$

$$O_4 = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^D \frac{c_{ij}}{1 + |i-j|} \quad (\text{A.21})$$

mit

$$r_1 = \sum_{i=1}^D i P(i) \text{ und } r_2 = \sum_{j=1}^D j P(j),$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=1}^D (i - r_1)^2 P(i) \text{ und } \sigma_2^2 = \sum_{j=1}^D (j - r_2)^2 P(j),$$

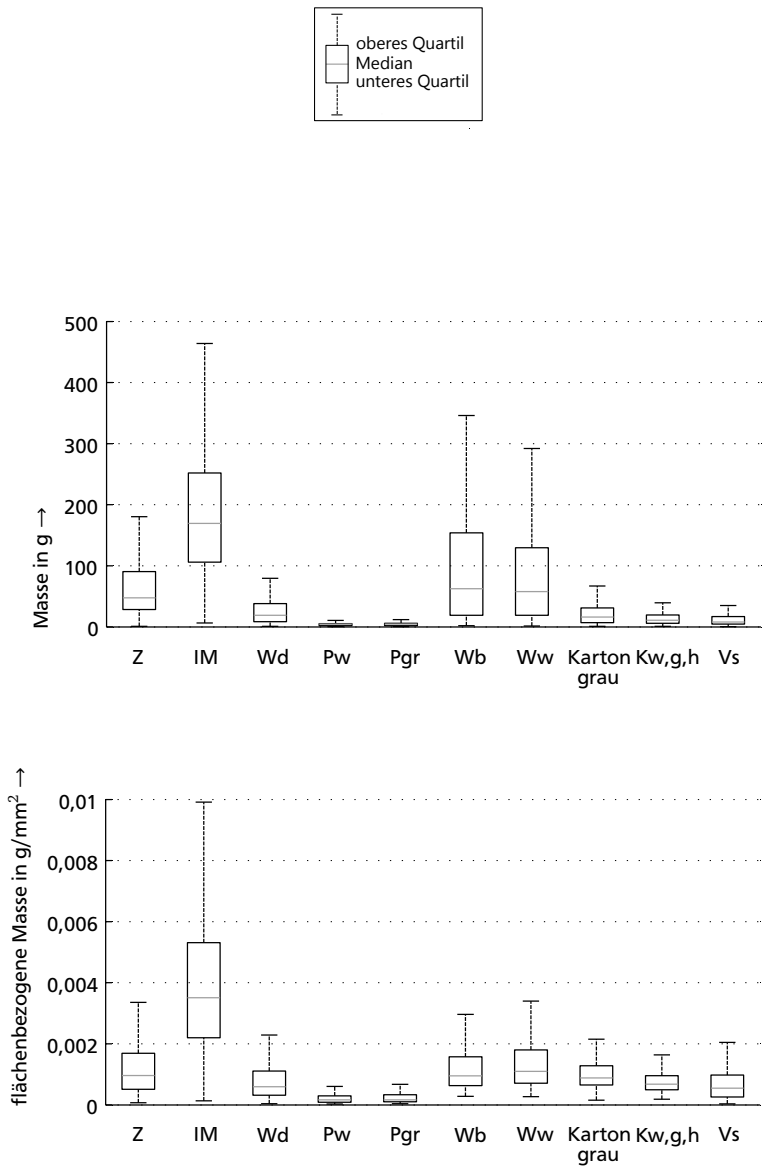
$$P(i) = \sum_{j=1}^D c_{ij} \text{ und } P(j) = \sum_{i=1}^D c_{ij},$$

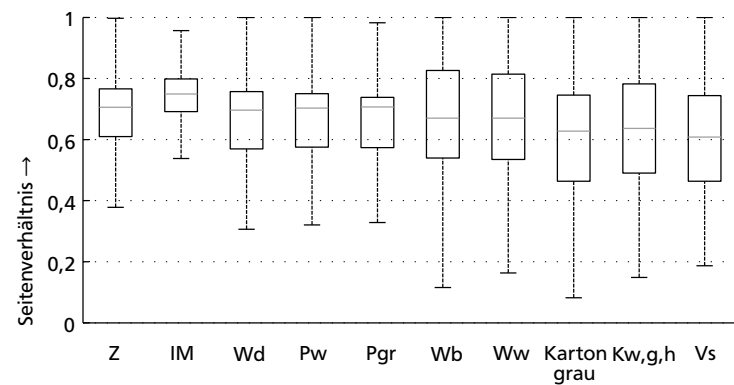
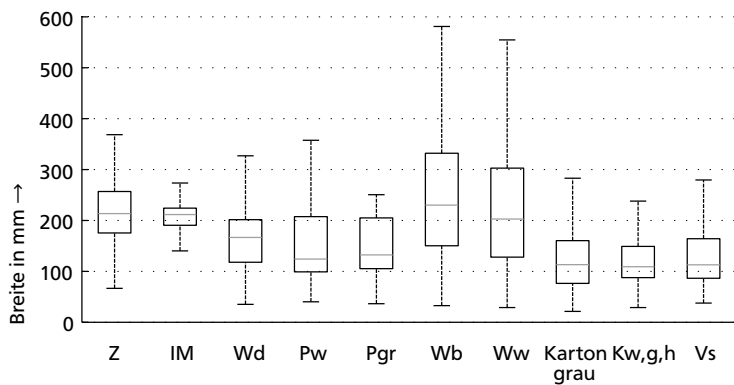
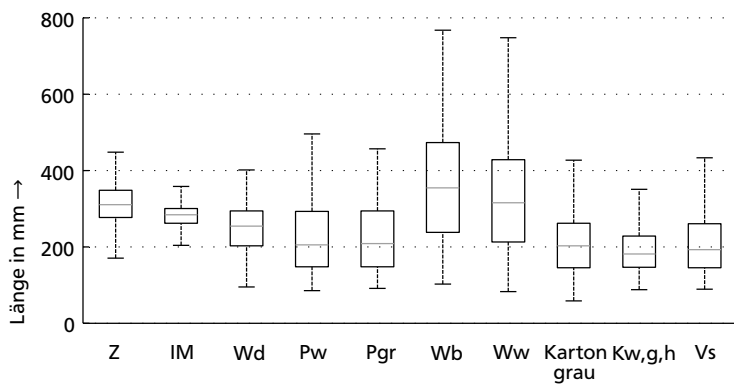
wobei

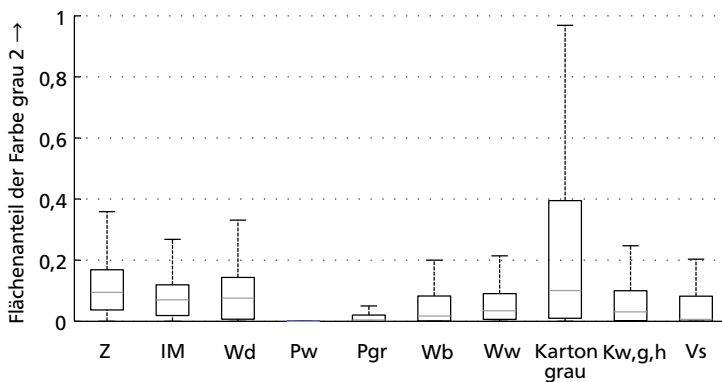
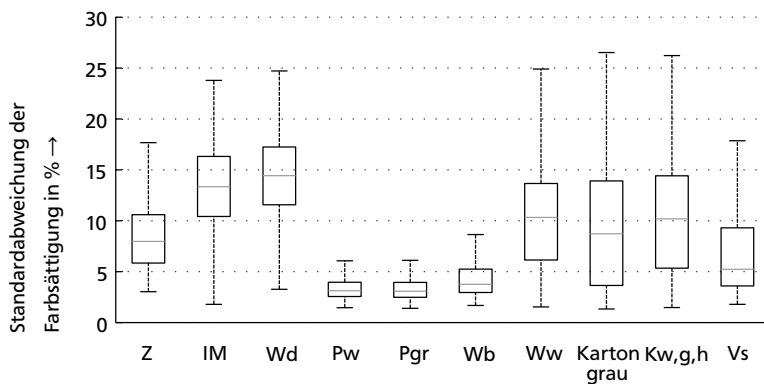
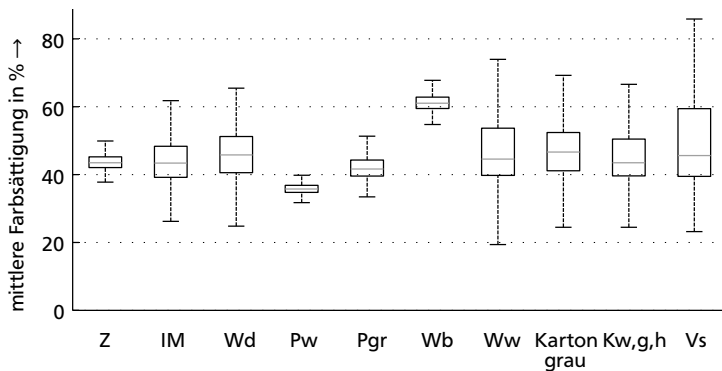
D : Dimension der quadratischen Co-Occurrence-Matrix.

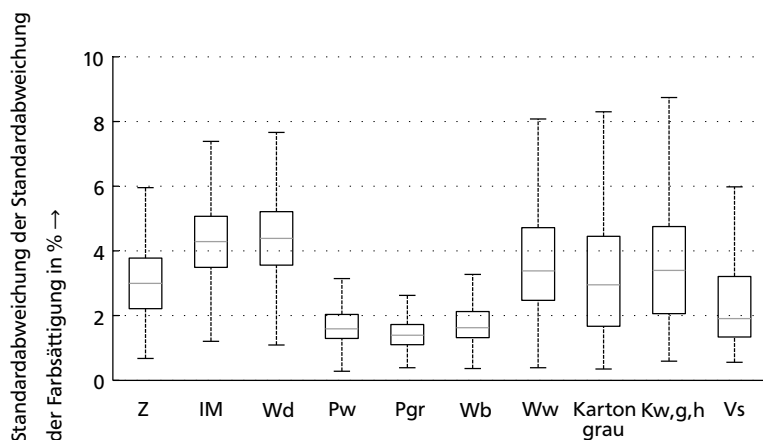
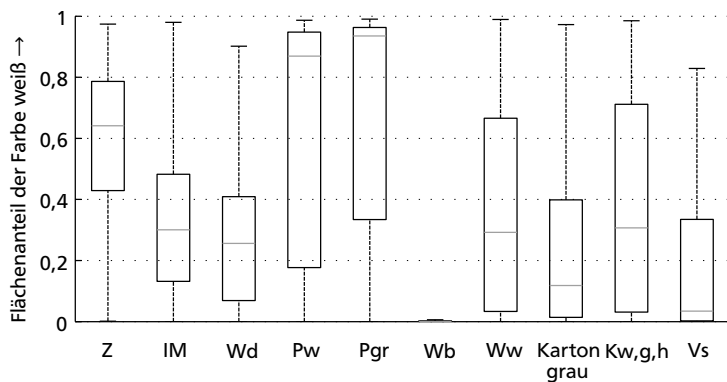
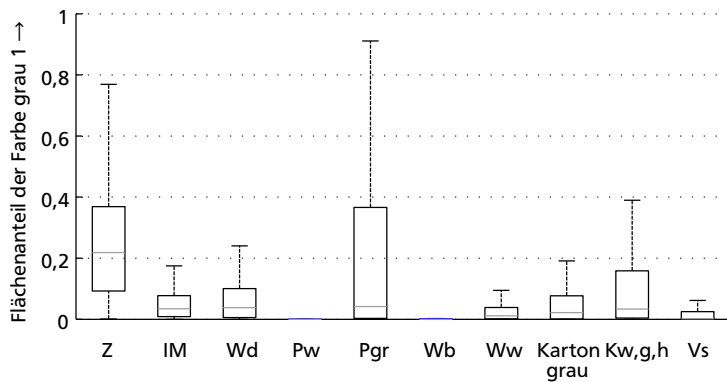
In dieser Arbeit werden diese Merkmale anhand von Co-Occurrence-Matrizen mit acht Grauwertstufen und einem Positionsoperator, der ein Pixel mit seinem direkten rechten Nachbar in Beziehung setzt, berechnet.

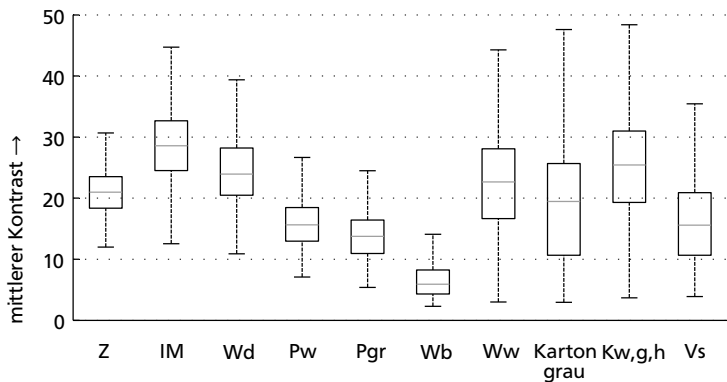
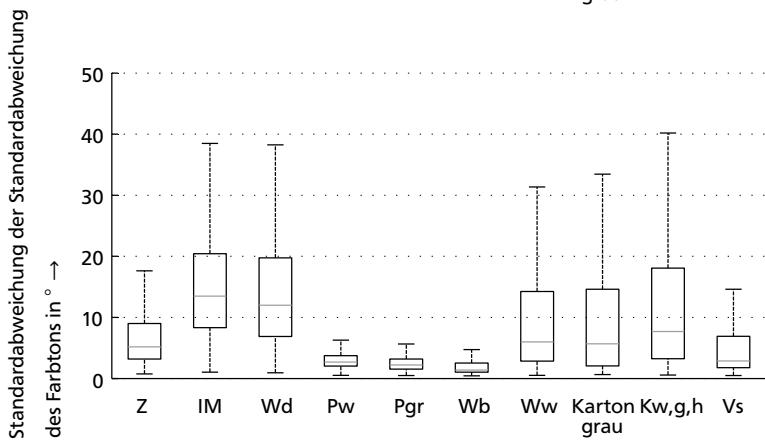
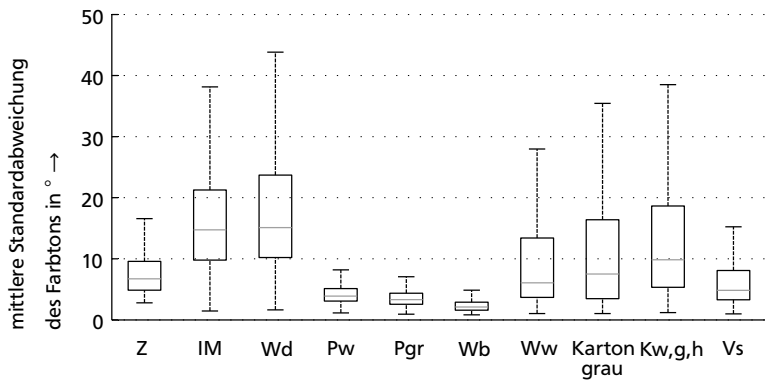
A.3 Ergebnisse der statistischen Analyse der Merkmale

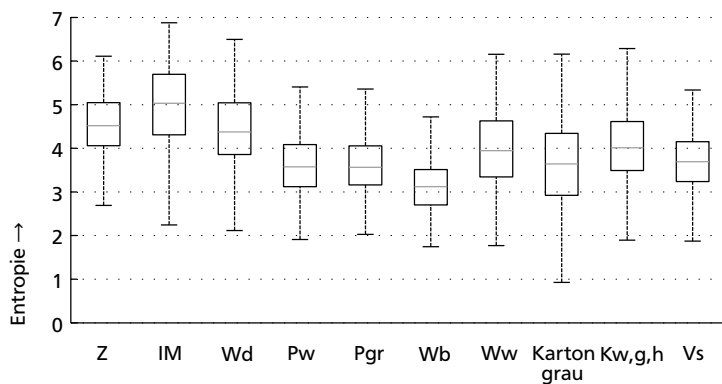
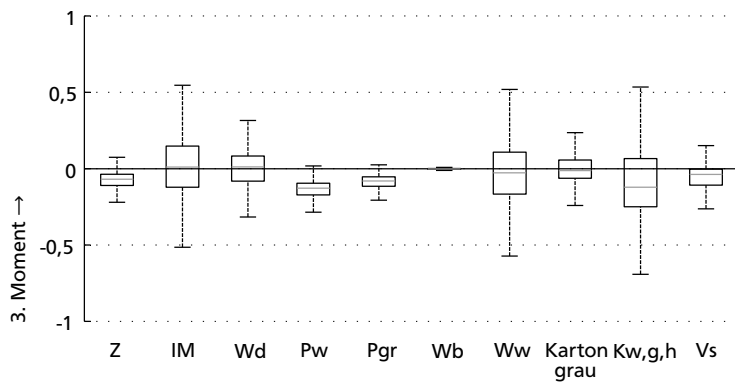
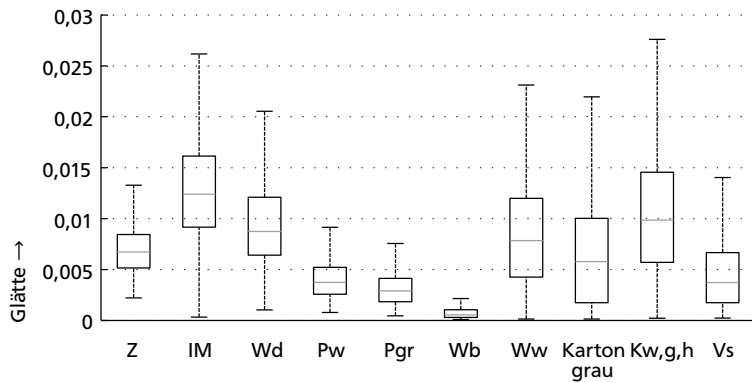


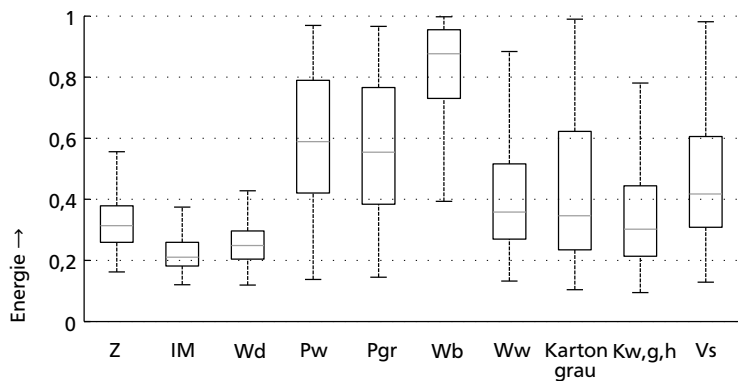
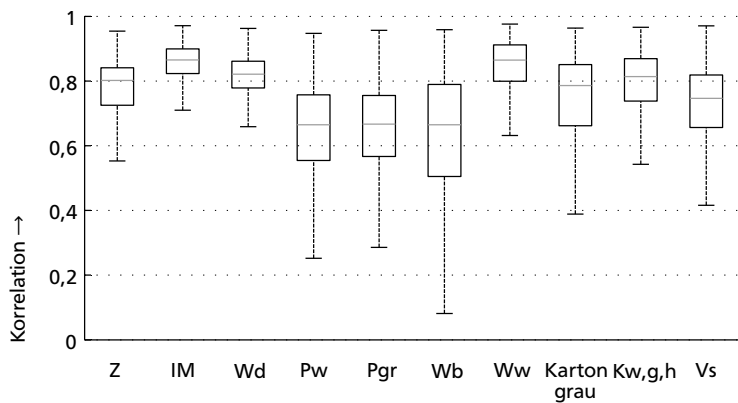
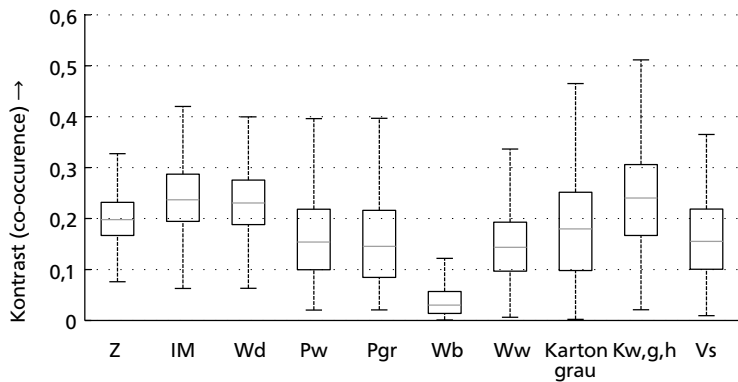


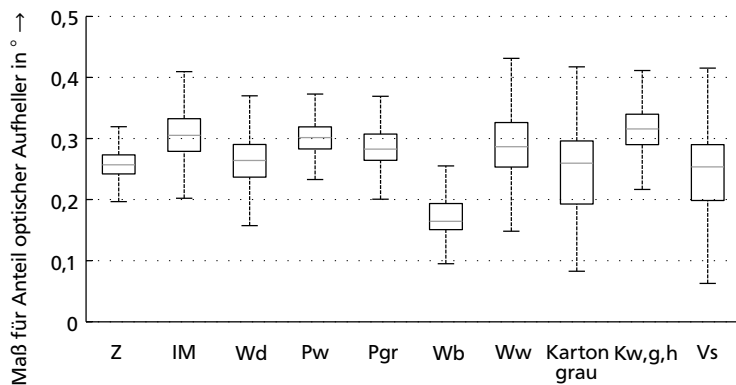
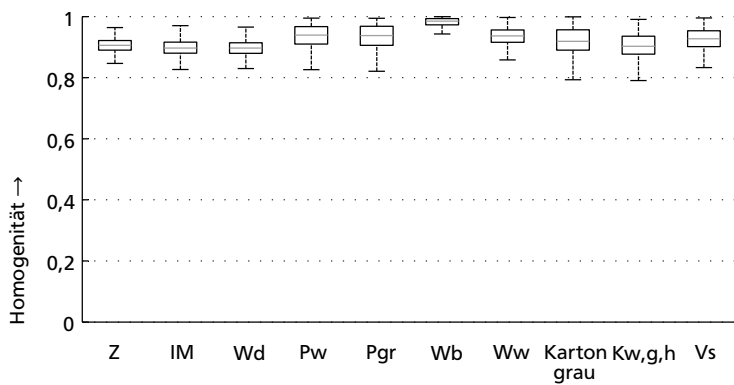














B Zuordnungskatalog der Stoffgruppen für händische Sortieranalysen

Stoffgruppe	Zuordnungsbeispiele
Zeitungen (Z)	Tageszeitungen Wochenzeitungen kostenlose Zeitungen
Illustrierte und Magazine (IM)	Zeitschriften Kataloge ohne festen Einband hochwertige Broschüren
Werbedruck (Wd)	Werbeprospekte Beilagen zu Zeitungen, Zeitschriften und Katalogen zeitungsähnlicher Werbedruck Flyer Einzelblätter von Zeitschriften einfache Broschüren
Bücher (B)	Taschenbücher Bücher mit festem Einband Kataloge mit festem Einband Telefonbücher (nicht durchgefärbt)
Papiere weiß, hell (Pw)	Schreibpapier Druckpapier Briefumschläge und Versandtaschen Gebrauchsanweisungen einfache Flyer Beipackzettel
Papiere grau, gelblich (Pgr)	Schreibpapier Druckpapier Briefumschläge und Versandtaschen
gefärbte grafische Papiere (Pge)	Briefumschläge Schreibpapier Druckpapier Telefonbücher

Wellpappen braun (Wb)	Versandpäckchen/-pakete Verpackungskisten
Wellpappen weiß (Ww)	Pizzakartons Versandpäckchen/-pakete Verpackungskisten
Karton und Pappe grau, braun und gefärbt (Kgr,b,ge)	Faltschachteln Rückwände von Blistern Kartoneinlagen Hülsen Schnellhefter Karteikarten Eierkartons Faserformteile für Verpackungszwecke
Karton weiß,gelb,hell (Kw,g,h)	Faltschachteln Kartoneinlagen Karteikarten
sonstige Verpackungspapiere (Vs)	Tüten und Tragetaschen Papiersäcke Lebensmittelbeutel (unverschmutzt) Packpapier Geschenkpapier braune Briefumschläge Polstermaterial
Hygienepapiere (H)	Papiertaschentücher (unverschmutzt) Papierhandtücher Küchenpapier (unverschmutzt) Servietten (unverschmutzt)
sonstige ungeeignete Papiere, Pappen, Karton (PPKu)	Tapete Silikonpapier Backpapier Fotos Getränkekartons eindeutig gewachste oder nassfeste Papiere
papierfremde Bestandteile (pf)	Kunststoffe Holz Textilien Metall
gemischte Objekte (g)	gefüllte Kisten in Folie eingeschweißte Objekte fest ineinandergesteckte, verklebte, geheftete oder verknüllte Objekte ungeöffnete Objekte

C Messdaten

Mit ^H sind Daten gekennzeichnet, die durch rein händische Probenanalysen ermittelt wurden.

Mit * sind Daten gekennzeichnet, die von dem jeweiligen Betreiber der untersuchten Altpapiersortieranlage zur Verfügung gestellt wurden.

Zur Bestimmung des Feuchtegehalts wurde das Wärmeschränkverfahren eingesetzt.

C.1 Grobsiebung

Tabelle C.1: Übersicht der Daten zur Grobsiebung Nr. 1

Stoffstrom	Probenanzahl	Probenentnahmeverfahren	Gesamtprobenmasse in kg	Massenstrom in t/h	Feuchtegehalt in %
E	7	Haufwerk	125	28,6*	8,7 ± 0,7
g	5	Bunker	54	3,3*	-

Tabelle C.2: Probenzusammensetzungen zur Grobsiebung Nr. 1

Stoff- gruppe	Massenanteil in %			
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_g	$s_{\bar{a}_g}$
Z	16,1	1,2	1,6	0,2
IM	20,8	0,9	0,0	0,0
Wd	17,0	1,1	0,0	0,0
B	5,3	0,6	0,0	0,0
Pw	3,6	0,5	0,1	0,0
Pgr	0,8	0,1	0,0	0,0
Pge	0,0	0,0	0,0	0,0
Wb	13,6	2,6	44,2	2,9
Ww	6,9	0,8	33,9	2,6
Kgr,b,ge	3,6	0,3	4,0	0,6
Kw,g,h	1,0	0,1	0,5	0,2
Vs	1,0	0,1	1,5	0,3
H	0,2	0,0	0,0	0,0
PPKv	0,5	0,2	0,0	0,0
PPKu	0,1	0,0	0,0	0,0
pf	0,6	0,1	0,0	0,0
g	6,5	0,6	13,5	1,1
S	1,6	0,2	0,0	0,0

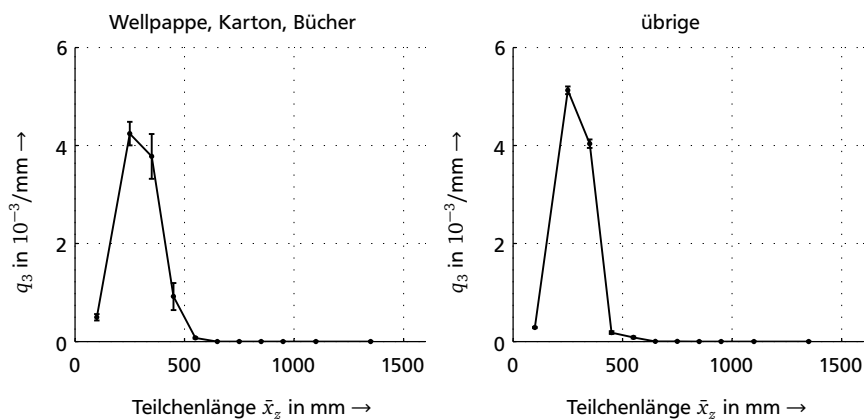


Bild C.1: Teilchengrößenverteilungsdichten des Grobguts der Feinsiebung, die sich an die Grobsiebung Nr. 1 anschließt

Tabelle C.3: Übersicht der Daten zur Grobsiebung Nr. 2

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h	Feuchtegehalt in %
E	6	Haufwerk	136	8,0*	7,2 ± 1,0
g	6	Auffangen	56	0,6*	-

Tabelle C.4: Probenzusammensetzungen zur Grobsiebung Nr. 2

Stoff- gruppe	Massenanteil in %			
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_g	$s_{\bar{a}_g}$
Z	15,0	0,4	2,6	0,2
IM	17,9	1,2	0,0	0,0
Wd	19,1	1,1	1,7	0,7
B	2,6	0,5	0,0	0,0
Pw	3,6	0,3	3,1	1,4
Pgr	0,7	0,1	0,0	0,0
Pge	0,2	0,0	0,0	0,0
Wb	13,7	1,4	67,1	4,4
Ww	7,1	0,6	15,1	1,9
Kgr,b,ge	4,0	0,2	0,9	0,2
Kw,g,h	1,2	0,1	0,1	0,1
Vs	1,0	0,1	0,1	0,0
H	0,2	0,0	0,0	0,0
PPKv	0,3	0,1	0,4	0,2
PPKu	0,5	0,2	0,5	0,2
pf	0,7	0,1	2,3	1,2
g	9,9	1,4	5,9	1,3
S	1,4	0,0	0,0	0,0

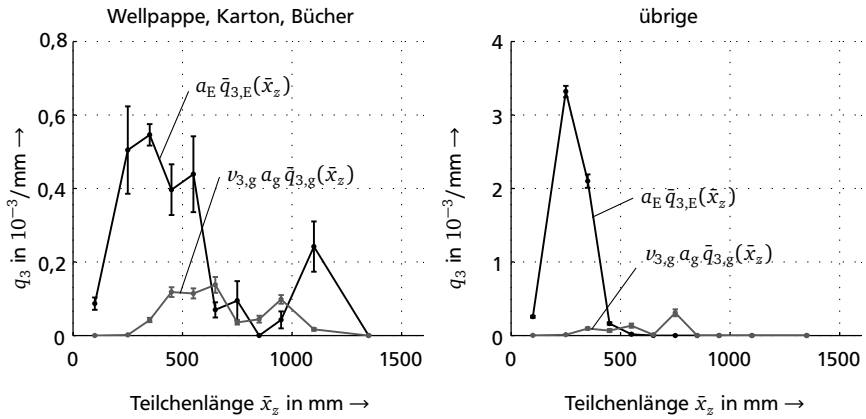


Bild C.2: Gewichtete Teilchengrößenverteilungsdichten der Grobsiebung Nr. 2

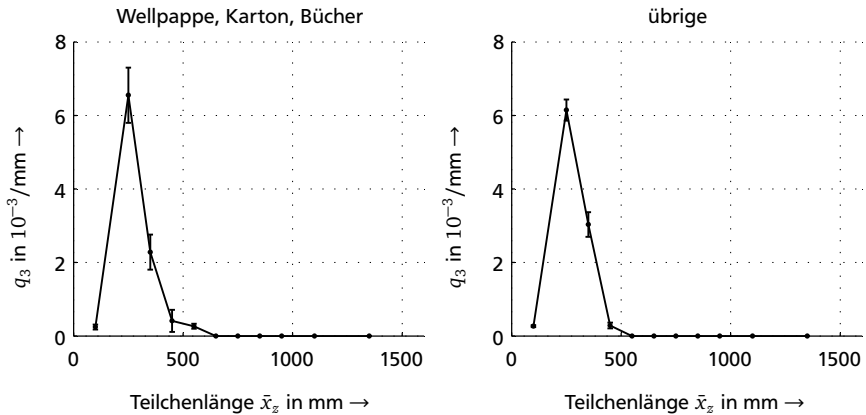


Bild C.3: Teilchengrößenverteilungsdichten des Grobguts der Feinsiebung, die sich an die Grobsiebung Nr. 2 anschließt

Tabelle C.5: Übersicht der Daten zur Grobsiebung Nr. 3

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h	Feuchtegehalt in %
E	5	Haufwerk	73	13,0*	6,7 ± 0,7
g	5	Auffangen	56	1,0*	-

Tabelle C.6: Probenzusammensetzungen zur Grobsiebung Nr. 3

Stoff- gruppe	Massenanteil in %			
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_g	$s_{\bar{a}_g}$
Z	23,7	2,0	0,7	0,2
IM	14,0	0,8	0,0	0,0
Wd	14,5	1,1	0,4	0,1
B	0,9	0,3	2,4	1,0
Pw	5,8	0,4	0,1	0,0
Pgr	0,8	0,1	0,0	0,0
Pge	0,2	0,0	0,0	0,0
Wb	11,5	1,1	49,2	2,6
Ww	9,1	1,7	32,9	1,6
Kgr,b,ge	4,4	0,6	1,4	0,5
Kw,g,h	1,3	0,1	0,0	0,0
Vs	2,7	0,4	0,1	0,1
H	0,7	0,2	0,0	0,0
PPKv	0,3	0,1	0,0	0,0
PPKu	0,1	0,0	0,0	0,0
pf	0,7	0,1	0,0	0,0
g	7,1	1,3	12,5	3,2
S	1,3	0,2	0,0	0,0

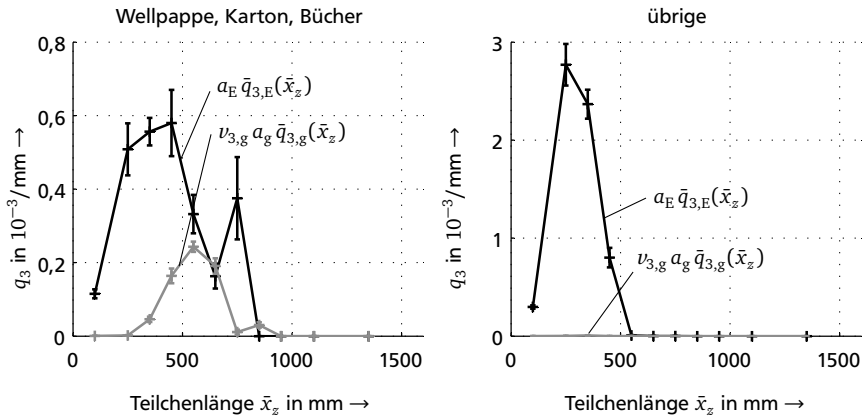


Bild C.4: Gewichtete Teilchengrößenverteilungsdichten der Grobsiebung Nr. 3

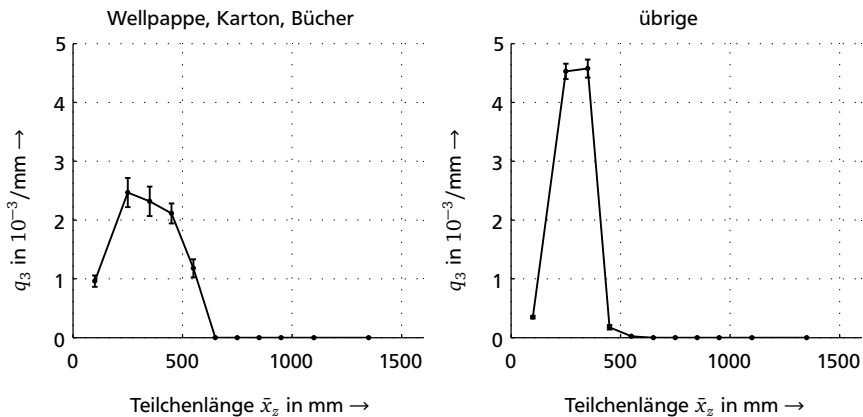


Bild C.5: Teilchengrößenverteilungsdichten des Grobguts der Feinsiebung, die sich an die Grobsiebung Nr. 3 anschließt

Tabelle C.7: Übersicht der Daten zur Grobsiebung Nr. 4

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h	Feuchtegehalt in %
E	3	Haufwerk	99	12,0*	8,8 ± 3,1
g	3	Haufwerk	40	0,6*	-

Tabelle C.8: Probenzusammensetzungen zur Grobsiebung Nr. 4

Stoff- gruppe	Massenanteil in % ^H			
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_g	$s_{\bar{a}_g}$
Z	13,9	1,8	0,7	0,1
IM	25,9	2,1	0,2	0,1
Wd	19,6	2,2	0,1	0,1
B	1,4	0,3	0,0	0,0
Pw	2,8	0,7	0,3	0,2
Pgr	0,4	0,1	0,0	0,0
Pge	0,1	0,0	0,2	0,2
Wb	7,9	2,1	54,3	2,5
Ww	6,7	0,9	23,3	0,8
Kgr,b,ge	2,7	0,2	0,9	0,5
Kw,g,h	1,4	0,3	0,3	0,1
Vs	2,3	1,1	1,5	0,7
H	0,3	0,0	0,0	0,0
PPKv	2,3	1,0	0,0	0,0
PPKu	0,1	0,0	0,7	0,5
pf	0,2	0,0	1,6	0,9
g	8,8	1,0	15,1	4,5
S	2,6	0,2	0,0	0,0

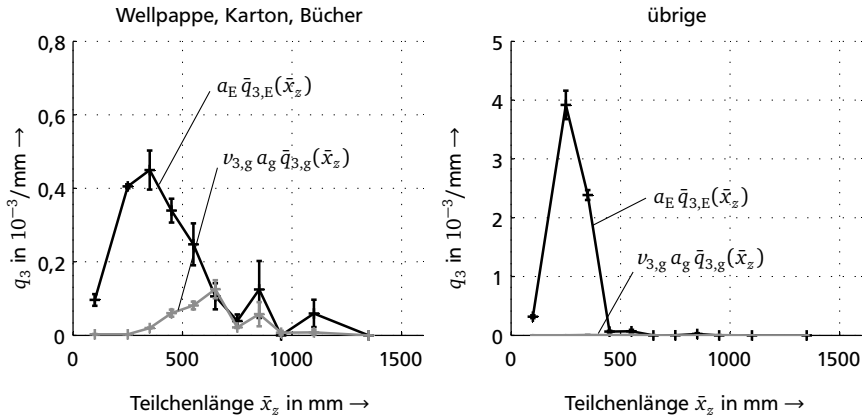


Bild C.6: Gewichtete Teilchengrößenverteilungsdichten der Grobsiebung Nr. 4

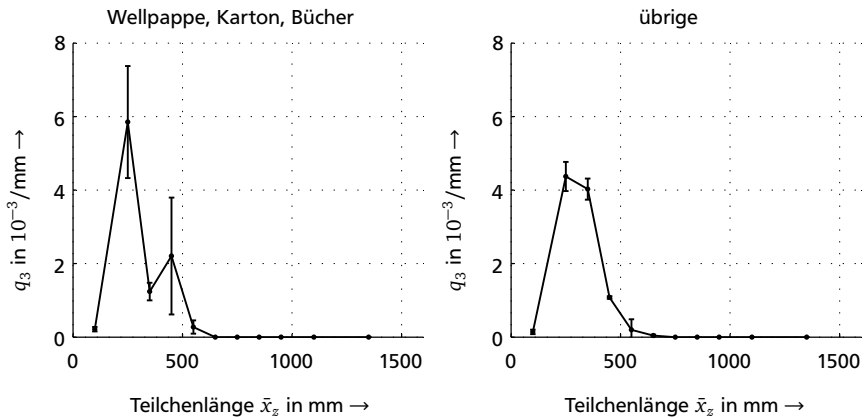


Bild C.7: Teilchengrößenverteilungsdichten des Grobguts der Feinsiebung, die sich an die Grobsiebung Nr. 4 anschließt

C.2 Feinsiebung

Tabelle C.9: Übersicht der Daten zur Feinsiebung Nr. 1

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
g	6	Abräumen vom Band	47	$6,0 \pm 0,5$
f	6	Bunker	45	1,3

Tabelle C.10: Probenzusammensetzungen zur Feinsiebung Nr. 1

Stoff- gruppe	Massenanteil in %			
	\bar{a}_g	$s_{\bar{a}_g}$	\bar{a}_f	$s_{\bar{a}_f}$
Z	19,2	2,0	8,1	0,4
IM	21,4	1,4	7,8	0,9
Wd	20,8	1,2	19,1	0,7
B	5,1	1,3	0,0	0,0
Pw	5,3	0,3	6,2	0,5
Pgr	1,2	0,1	1,1	0,1
Pge	0,3	0,1	0,2	0,0
Wb	4,9	0,8	2,9	0,4
Ww	5,5	0,5	1,1	0,1
Kgr,b,ge	3,7	0,3	5,0	0,3
Kw,g,h	1,4	0,2	3,1	0,2
Vs	2,0	0,5	2,1	0,1
H	0,9	0,3	1,9	0,1
PPKv	0,6	0,2	0,6	0,1
PPKu	0,8	0,3	0,5	0,1
pf	0,5	0,1	1,1	0,2
g	4,5	0,7	2,8	0,5
S	0,7	0,2	34,9	1,6

Tabelle C.11: Übersicht der Daten zur Feinsiebung Nr. 2

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
g	4	Abräumen vom Band	23	$2,8 \pm 0,4$
f	3	Auffangen	28	$0,7 \pm 0,1$

Tabelle C.12: Probenzusammensetzungen zur Feinsiebung Nr. 2

Stoff- gruppe	Massenanteil in % ^H			
	\bar{a}_g	$s_{\bar{a}_g}$	\bar{a}_f	$s_{\bar{a}_f}$
Z	15,9	1,6	5,1	0,4
IM	29,7	2,7	7,5	3,1
Wd	28,1	2,8	26,1	1,6
B	6,1	3,2	2,8	0,8
Pw	5,8	1,5	8,8	1,3
Pgr	0,4	0,1	1,5	0,2
Pge	0,1	0,0	0,5	0,1
Wb	2,7	0,4	1,2	0,1
Ww	2,0	0,6	3,1	0,4
Kgr,b,ge	2,3	0,4	7,9	1,1
Kw,g,h	1,6	0,4	4,6	0,4
Vs	1,4	0,3	1,9	0,4
H	0,1	0,1	1,5	0,2
PPKv	0,0	0,0	0,7	0,1
PPKu	0,2	0,1	1,2	0,4
pf	0,1	0,0	3,5	0,2
g	3,0	0,4	4,4	1,2
S	0,1	0,0	15,4	0,6

C.3 Paperspikeprozess

Tabelle C.13: Übersicht der Daten zum Paperspikeprozess

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
E	7	Abräumen vom Band	33	-
a	7	Abräumen vom Band	28	-
r	7	Abräumen vom Band	34	-

Tabelle C.14: Probenzusammensetzungen zum Paperspikeprozess

Stoff- gruppe	Massenanteil in %					
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_a	$s_{\bar{a}_a}$	\bar{a}_r	$s_{\bar{a}_r}$
Z	18,3	1,1	16,8	0,8	1,9	0,2
IM	19,7	1,3	18,8	1,5	6,4	0,7
Wd	18,3	1,2	21,5	0,7	3,7	0,2
B	3,0	0,5	5,8	1,1	0,0	0,0
Pw	4,9	0,8	6,4	0,6	1,6	0,3
Pgr	0,6	0,1	1,9	0,3	0,3	0,0
Pge	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Wb	7,8	1,0	4,3	0,6	29,0	1,3
Ww	9,0	0,8	3,4	0,6	27,2	1,0
Kgr,b,ge	7,1	0,7	5,0	0,3	10,0	1,2
Kw,g,h	4,3	0,4	5,1	1,1	4,6	0,6
Vs	1,3	0,1	2,6	0,3	2,9	0,2
H	0,4	0,1	0,3	0,0	0,2	0,0
PPKv	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PPKu	0,0	0,0	0,1	0,0	0,7	0,2
pf	0,2	0,0	1,0	0,3	1,2	0,3
g	3,5	0,8	5,7	1,2	7,7	0,9
S	0,2	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0

C.4 Automatische Klaubung

Tabelle C.15: Übersicht der Daten zur automatischen Klaubung Nr. 1

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
E	6	Abräumen vom Band	84	8,1,± 1,6
a	6	Abräumen vom Band	65	6,2,± 0,7

Tabelle C.16: Probenzusammensetzungen zur automatischen Klaubung Nr. 1

Stoff- gruppe	Massenanteil in %			
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_a	$s_{\bar{a}_a}$
Z	20,1	1,0	22,5	0,7
IM	26,0	1,8	23,1	0,5
Wd	18,9	0,9	28,9	0,9
B	7,9	1,1	7,9	1,3
Pw	7,9	1,7	4,3	0,3
Pgr	1,6	0,4	1,1	0,1
Pge	1,4	0,3	0,0	0,0
Wb	1,3	0,2	0,6	0,1
Ww	2,0	0,5	1,5	0,3
Kgr,b,ge	2,9	0,3	3,2	0,3
Kw,g,h	1,2	0,1	1,1	0,1
Vs	1,1	0,1	0,5	0,0
H	0,2	0,0	0,2	0,0
PPKv	0,8	0,2	0,0	0,0
PPKu	0,1	0,0	0,1	0,0
pf	1,0	0,2	0,5	0,2
g	4,3	0,5	3,3	0,5
S	0,4	0,1	0,2	0,0

Tabelle C.17: Übersicht der Daten zur automatischen Klaubung Nr. 2

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
a	4	Abräumen vom Band	21	$8,0 \pm 2,2$
r	4	Auffangen	29	$1,0 \pm 0,2$

Tabelle C.18: Probenzusammensetzungen zur automatischen Klaubung Nr. 2

Stoff- gruppe	Massenanteil in %			
	\bar{a}_a	$s_{\bar{a}_a}$	\bar{a}_r	$s_{\bar{a}_r}$
Z	29,5	0,7	4,6	0,7
IM	20,7	2,2	6,8	1,0
Wd	22,5	1,7	5,9	0,4
B	0,0	0,0	12,8	3,2
Pw	4,4	1,3	1,5	0,2
Pgr	0,6	0,2	0,6	0,1
Pge	0,0	0,0	0,6	0,1
Wb	0,3	0,1	18,5	1,0
Ww	1,5	0,4	14,9	1,4
Kgr,b,ge	5,5	0,3	5,8	0,5
Kw,g,h	0,5	0,1	2,3	0,4
Vs	5,2	3,1	11,1	0,7
H	0,3	0,1	0,2	0,0
PPKv	0,0	0,0	0,6	0,3
PPKu	0,3	0,1	1,8	0,3
pf	0,0	0,0	4,1	1,6
g	6,9	1,6	4,8	1,9
S	0,3	0,0	0,4	0,1

C.5 Handklaubung

Tabelle C.19: Übersicht der Daten zur Handklaubung Nr. 1

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
E	6	Bunker	77	18,4
a	6	Bunker	68	-
un	6	Auffangen	25	0,5
f	1	Auffangen	10	0,2

Tabelle C.20: Probenzusammensetzungen zur Handklaubung Nr. 1

Stoff- gruppe	Massenanteil in %						
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_a	$s_{\bar{a}_a}$	\bar{a}_{un}	$s_{\bar{a}_{un}}$	\bar{a}_f
Z	22,8	0,8	29,5	1,4	0,5	0,2	0,0
IM	32,6	0,9	21,4	1,8	0,7	0,3	0,0
Wd	17,7	0,4	29,6	0,8	0,4	0,1	0,0
B	6,9	1,1	2,1	0,6	0,3	0,1	0,0
Pw	5,3	0,2	5,2	0,3	0,2	0,1	0,0
Pgr	1,1	0,1	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0
Pge	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wb	0,7	0,1	0,7	0,1	10,5	1,1	0,0
Ww	2,7	0,3	0,8	0,2	39,9	1,2	0,0
Kgr,b,ge	2,4	0,1	1,7	0,2	19,3	1,4	0,0
Kw,g,h	2,4	0,1	0,9	0,1	1,8	0,2	0,0
Vs	0,5	0,1	0,4	0,1	2,1	0,2	0,0
H	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
PPKv	0,1	0,0	0,0	0,0	0,8	0,3	0,0
PPKu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
pf	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	100,0
g	3,5	0,6	5,1	0,3	13,7	1,3	0,0
S	0,5	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,0

Tabelle C.21: Übersicht der Daten zur Handklaubung Nr. 2

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
a	6	Auffangen	96	$5,02 \pm 0,90$
un	4	Auffangen	33	0,67
f	1	Auffangen	2	0,03

Tabelle C.22: Probenzusammensetzungen zur Handklaubung Nr. 2

Stoff- gruppe	Massenanteil in %				
	\bar{a}_a	$s_{\bar{a}_a}$	\bar{a}_{un}	$s_{\bar{a}_{un}}$	\bar{a}_f
Z	24,4	0,6	0,7	0,2	0,0
IM	33,2	0,9	3,2	0,6	0,0
Wd	25,1	0,9	1,9	0,5	0,0
B	2,3	0,5	0,7	0,3	0,0
Pw	5,0	0,2	0,6	0,1	0,0
Pgr	0,9	0,1	0,4	0,1	0,0
Pge	0,1	0,0	0,4	0,1	0,0
Wb	0,6	0,0	27,1	4,7	0,0
Ww	0,8	0,1	26,1	1,9	0,0
Kgr,b,ge	2,5	0,2	13,4	2,0	0,0
Kw,g,h	1,0	0,1	3,6	0,9	0,0
Vs	0,6	0,1	9,6	1,3	0,0
H	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
PPKv	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
PPKu	0,4	0,1	3,2	1,0	0,0
pf	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
g	2,2	0,3	6,2	1,2	0,0
S	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0

C.6 Gesamtanlage

Tabelle C.23: Übersicht der Daten der Gesamtanlage

Stoff- strom	Proben- anzahl	Probenent- nahmeverfahren	Gesamtproben- masse in kg	Massenstrom in t/h
E	5	Haufwerk	119	28,6*
GS _g	4	Bunker	58	3,3*
FS _f	3	Abräumen vom Band	11	2,3 ± 1,0
FS _g	3	Bunker	34	-
AK _a	3	Abräumen vom Band	38	19,6 ± 2,8

Tabelle C.24: Probenzusammensetzungen der Gesamtanlage

Stoff- gruppe	Massenanteil in % ^H									
	\bar{a}_E	$s_{\bar{a}_E}$	\bar{a}_{GS_g}	$s_{\bar{a}_{GS_g}}$	\bar{a}_{FS_f}	$s_{\bar{a}_{FS_f}}$	\bar{a}_{FS_g}	$s_{\bar{a}_{FS_g}}$	\bar{a}_{AK_a}	$s_{\bar{a}_{AK_a}}$
Z	12,2	1,6	1,2	0,2	5,9	1,2	21,3	1,4	21,8	1,5
IM	20,7	2,3	0,0	0,0	2,2	1,5	16,3	2,2	29,5	2,7
Wd	13,9	1,7	0,2	0,1	17,7	0,3	22,6	3,0	16,2	2,3
B	6,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	4,0	9,7	2,2
Pw	9,6	1,4	0,4	0,2	8,1	0,9	6,3	1,1	10,0	0,5
Pgr	0,3	0,1	0,2	0,1	3,5	1,1	5,5	0,8	1,5	0,3
Pge	1,0	0,4	0,0	0,0	0,8	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
Wb	12,3	1,6	54,6	1,7	3,1	0,3	2,2	0,5	0,8	0,2
Ww	6,8	0,3	34,7	0,9	2,8	0,4	6,7	1,7	2,7	0,2
Kgr,b,ge	4,0	0,5	2,2	0,7	6,0	0,9	3,7	0,6	1,9	0,4
Kw,g,h	1,5	0,2	3,0	1,3	3,1	0,5	1,6	0,1	3,0	1,0
Vs	2,4	0,4	2,9	0,9	2,0	0,2	2,3	0,3	1,2	0,5
H	0,3	0,1	0,0	0,0	2,5	0,6	0,0	0,0	0,1	0,0
PPKv	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1	0,4	0,2
PPKu	0,2	0,0	0,3	0,2	0,8	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
pf	1,1	0,2	0,3	0,1	3,0	0,5	0,5	0,0	0,1	0,0
g	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
S	6,4	0,7	0,0	0,0	35,5	1,8	0,6	0,1	0,8	0,2

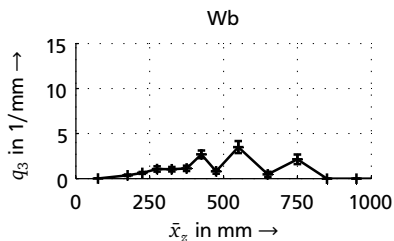
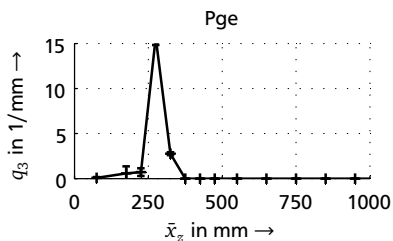
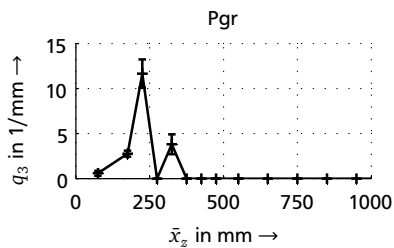
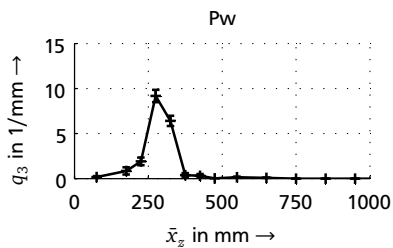
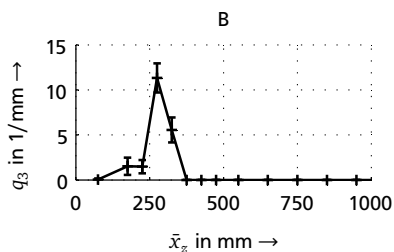
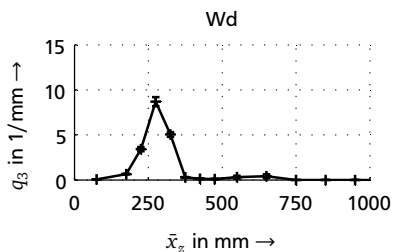
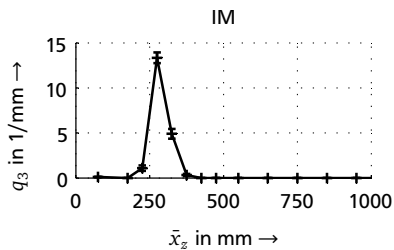
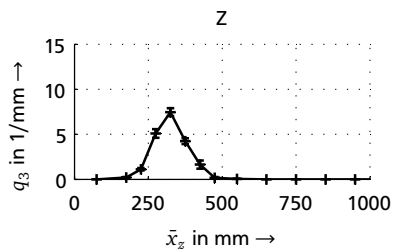


Bild C.8: Teilchengrößenverteilungsdichten der Stoffgruppen Z bis Wb des Stoffstroms E der Gesamtanlage

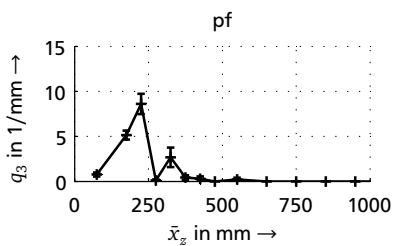
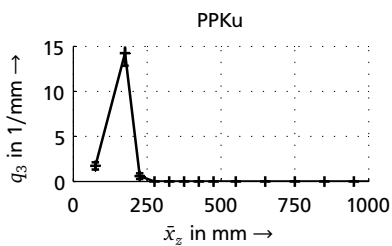
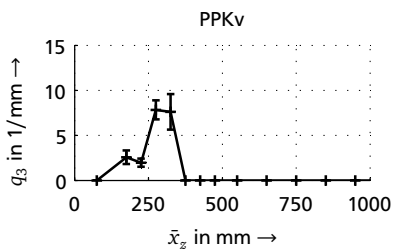
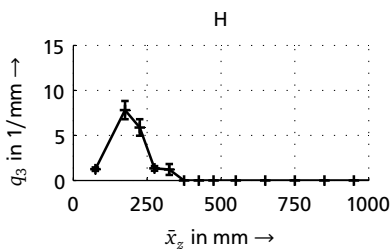
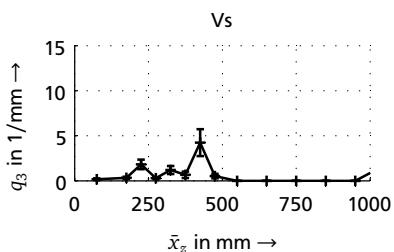
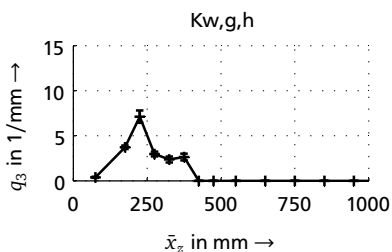
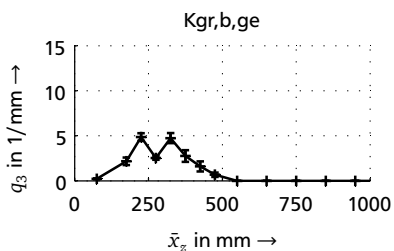
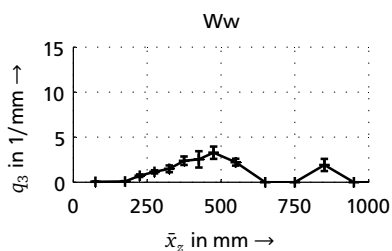


Bild C.9: Teilchengrößenverteilungsdichten der Stoffgruppen Ww bis pf des Stoffstroms E der Gesamtanlage